Manual de industrias lácteas

210

Manual de industrias lácteas

ESTE LIBRO ES PROPIEDAD DEL SIB-UCE

SU VENTA ES PENADA POR LA LEY

637.1
B993
BG

MANUAL DE INDUSTRIAS LÁCTEAS

Año 2003

Tetra Pak Processing Systems AB
S-221 86 Lund, Suecia

Tetra Pak Hispania, S.A.
Latón, 8
28500 Arganda del Rey
(MADRID) ESPAÑA

Texto: Gösta Bylund, M. Sc. (Tecnología láctea)

Traducido de la versión inglesa a la española por:

Antonio López Gómez.
Dr. Ingeniero Agrónomo.
Catedrático de Universidad - Ingeniería de Alimentos.
ETSIA - Universidad Politécnica de Cartagena

Antonio Madrid Vicente.
Ingeniero Agrónomo.
Técnico Bromatólogo.

Este libro ha sido traducido del inglés al español, siguiendo la terminología oficial de la Federación Internacional de Lechería (FIL), contenida en: DICTIONARY OF DAIRY TERMINOLOGY (English, French, German and Spanish).
También se ha seguido la terminología técnica recomendada por Alfa Laval en su libro Technical Glossary for centrifugal separators, heat exchangers, pumps, etc.
(English and Spanish).

Se puede solicitar al editor material didáctico de este libro, tal como transparencias de las ilustraciones.

Editor de la versión inglesa: Teknotext AB, Suecia.
Ilustraciones: Origrit AB, Suecia.
Cubierta: Torkel Döhmers, Suecia.

Editores de la versión española:
A. Madrid Vicente, Ediciones
Calle Almansa, 94, 28040-Madrid
Tel. 91 533 69 26 - Fax. 91 553 02 86
E-mail: amadrid@acta.es
Internet: www.amvediciones.com

Mundi-Prensa Libros, S.A.
Calle Castelló, 37, 28001-Madrid
Tel: 91 436 37 00 - Fax: 91 575 39 98
E-mail: libreria@mundiprensa.es
Internet: www.mundiprensa.com

Imprime la versión española:
Iragra, S.A. Madrid
ISBN (AMV Ediciones): 84-89922-81-0
ISBN (Mundi-Prensa): 84-8476-094-4
Depósito legal: M-47678-2002

Prohibida la reproducción total o parcial del MANUAL DE INDUSTRIAS LÁCTEAS sin el permiso expreso de TETRA PAK.

Tetra Pak

Cod: 1136 05

Indice

1	La producción de leche	1
2	Química de la leche	13
3	Reología	37
4	Microorganismos	45
5	Recogida y recepción de la leche	65
6	Equipamiento de procesado de la leche	73
6.1	Intercambiadores de calor	75
6.2	Separadoras centrífugas y normalización de la grasa de la leche	91
6.3	Homogeneizadores	115
6.4	Filtros de membranas	123
6.5	Evaporadores	133
6.6	Desaireadores	139
6.7	Bombas	143
6.8	Tuberías, válvulas y accesorios	153
6.9	Tanques	161
6.10	Control de proceso	165
6.11	Sistemas auxiliares	175
7	Diseño de una línea de proceso	189
8	Productos lácteos pasteurizados	201
9	Leche de larga duración	215
10	Producción y preparación de cultivos y starters	233
11	Productos lácteos acidificados	241
12	Mantequilla y productos lácteos para untar	263
13	Grasa láctea anhídra. Aceite de mantequilla	279
14	El queso	287
15	Procesado del lactosuero	331
16	Leches concentradas	353
17	Leche en polvo	361
18	Productos lácteos recombinados	375
19	Helados	385
20	Caseina	395
21	Limpieza de los equipos	403
22	Efluentes de las industrias lácteas	415
	Literatura	425
	Indice desarrollado	427

La producción de leche

Capítulo 1

La producción de leche

La producción de leche se conoce desde hace más de 6.000 años. Los animales productores de leche de hoy en día han evolucionado a partir de animales salvajes que vivieron, durante miles de años, en habitats de diferentes latitudes y altitudes, y expuestos a distintas condiciones naturales, muchas veces severas y extremas.

El hombre comenzó a domesticar a los animales prácticamente en todas las zonas de la tierra. Pero, empezó domesticando a herbívoros, eligiendo aquellas especies animales que pudieran satisfacer sus necesidades de leche, carne, vestido, etc.

Se eligieron los animales herbívoros porque eran menos peligrosos y más faciles de manejar que los animales carnívoros. Además, los animales herbívoros no competían directamente con el hombre en su alimentación, ya que en general se alimentaban de plantas que el hombre no podía utilizar.

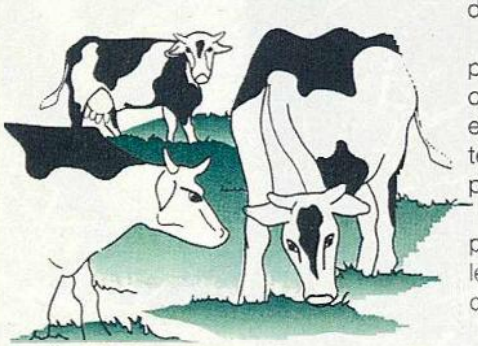
Los animales herbívoros que se utilizaron fueron todos los rumiantes a excepción de la yegua y el asno. Los rumiantes pueden comer rápidamente y en grandes cantidades, y rumiar más tarde la comida. Hoy en día, se utilizan los mismos animales de entonces para la producción de leche, que desde hace miles de años ha constituido uno de los componentes esenciales de la dieta humana.

Tabla 1.1
Composición de la leche procedente de diferentes especies animales.

Especie	Proteína total	Caseina	Seroproteina	Grasa	Carbohidratos	Cenizas
	%	%	%	%	%	%
Humana	1.2	0.5	0.7	3.8	7.0	0.2
Caballo	2.2	1.3	0.9	1.7	6.2	0.5
Vaca	3.5	2.8	0.7	3.7	4.8	0.7
Búfalo	4.0	3.5	0.5	7.5	4.8	0.7
Cabra	3.6	2.7	0.9	4.1	4.7	0.8
Oveja	5.8	4.9	0.9	7.9	4.5	0.8

El animal productor de leche más extendido en todo el mundo es la vaca, que puede encontrarse en todos los continentes y prácticamente en todos los paises. Sin embargo, no se ha de olvidar que existen otras especies animales cuya leche es de gran importancia para determinadas poblaciones como fuente de proteinas animales y otros constituyentes de alto valor nutritivo. La oveja tiene una importancia excepcional dentro de este grupo, especialmente en los paises Mediterráneos y en extensas áreas de Africa y Asia. El número de ovejas en el mundo supera los mil millones, lo que hace que esta especie sea la más numerosa entre los animales domésticos productores de leche y carne.

A menudo, las ovejas se crían junto a las cabras. Estas últimas tienen gran importancia por su producción de leche y carne en las zonas más pobres. Tanto las ovejas como las cabras son una fuente barata de proteinas de alta calidad y su explotación se limita a aquellas condiciones climáticas, topográficas, económicas, técnicas o sociológicas donde otros sistemas más sofisticados de producción de proteina animal no serían factibles.



La Tabla 1.1 muestra la composición de la leche procedente de diferentes especies animales. Las cifras dadas son valores medios, ya que la composición de la leche de las diversas especies puede verse influida por diferentes factores de producción, manejo, cría, alimentación, clima, etc.

Leche de vaca

La leche es el único alimento de los animales mamíferos durante el primer período de sus vidas. Las sustancias de la leche les proveen de energía y materiales estructurales que serán fundamentales para su crecimiento. La leche también contiene anticuerpos que protegen al mamífero cachorro contra las infecciones. Un ternero necesita alrededor de 1.000 litros de leche para su crecimiento. Precisamente, esta es la cantidad que la vaca primitiva producía, ya que era la que necesitaba cada ternero.

Pero, desde que el hombre domesticó a la vaca se ha producido un enorme cambio. La crianza selectiva ha dado como resultado vacas lecheras con rendimientos de más de 6.000 litros de leche por ternero, es decir, seis veces más que las vacas primitivas. Incluso, algunas vacas pueden dar hasta más de 14.000 litros.

Antes de que una vaca pueda empezar a producir leche debe tener un ternero. Las novillas llegan a su madurez sexual a la edad de 7 u 8 meses, pero normalmente no son fertilizadas hasta que tienen 15 a 18 meses. El período de gestación es de 265-300 dias, variando en función de la crianza de la vaca, por lo que una novilla puede tener su primer ternero a la edad de 2-2.5 años.

- La novilla es cubierta (de forma natural o por inseminación artificial) antes de los 2 años de edad.
- El período de gestación es de 9 meses.
- Tras el parto la vaca da leche durante 10 meses.
- 1-2 meses tras el parto la vaca será de nuevo preñada.
- Después de haber tenido unos cinco partos, la vaca generalmente será sacrificada.

Secreción de leche

La leche es segregada en la ubre de la vaca, que es un órgano semiesférico dividido en dos mitades, izquierda y derecha. Cada mitad está dividida en cuartos por un pliegue transversal poco profundo.

Cada cuarto tiene un pezón con su propia glándula mamaria, separada del resto, lo que en teoría podría dar lugar a cuatro diferentes calidades de leche procedente de la misma vaca. En la Figura 1.1 se muestra un dibujo de una ubre seccionada.

La ubre está compuesta de tejido glandular que contiene células productoras de leche y está encajada en un tejido muscular que da cohesión al cuerpo de la ubre y lo protege contra posibles daños por golpes y choques.

El tejido glandular contiene un gran número de diminutas vejigas (alrededor de dos mil millones) llamadas alveolos. Las células que realmente producen leche están situadas en las paredes internas de los alveolos, los cuales se encuentran en grupos de 8 a 120. Los capilares que salen de los alveolos convergen en conductos de leche progresivamente más grandes que fluyen hacia una cavidad situada encima del pezón. Esta cavidad, conocida como la cisterna de la ubre, puede contener hasta el 30% de la leche total de la ubre.

En el pueblo irlandés de Blackwater, la vaca Big Bertha murió el 31 de Diciembre de 1993. Era probablemente la vaca más vieja del mundo ya que murió a la edad de 49 años. El propietario, Mr Jerome O'Leary, dijo que Big Bertha prodría haber cumplido los 50 años el 15 de marzo de 1994.

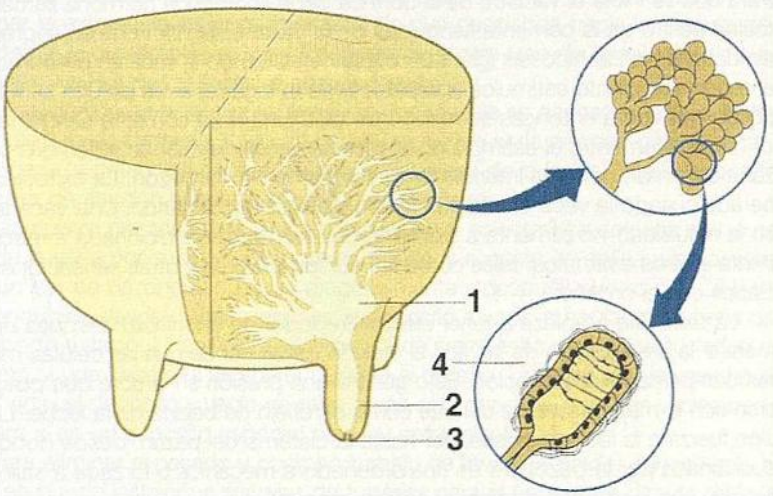


Fig. 1.1 *Vista de una ubre seccionada.*
1. *Cisterna de la ubre.*
2. *Cisterna del pezón.*
3. *Canal del pezón.*
4. *Alveolos.*

La sangre fluye a través de la ubre a razón de aproximadamente 90 000 l/día. Aproximadamente se necesitan 800 - 900 l de sangre para la formación de un litro de leche.

La cisterna de la ubre tiene una extensión que alcanza hasta la cavidad interior del pezón, que es conocida como cisterna del pezón. Este tiene en su extremo un canal de 1-1.5 cm de largo. Entre ordeños el canal está cerrado por un músculo esfínter que evita el goteo de la leche y que las bacterias entren en la ubre.

Toda la ubre está irrigada con vasos sanguíneos y linfáticos. Estos aportan sangre rica en nutrientes desde el corazón hasta la ubre, donde es distribuida por capilares que rodean a los alveolos. De este modo, las células productoras de leche son alimentadas con los nutrientes necesarios para la secreción de la leche. La sangre "agotada" es llevada por los capilares a las venas y retornada al corazón. El flujo de sangre a través de la ubre es de unos 90 000 litros por día. Se necesitan entre 800 y 900 litros de sangre para obtener un litro de leche.

Cuando los alveolos segregan leche, su presión interna aumenta. Si la vaca no es ordeñada, la secreción de leche se detiene cuando la presión alcanza un cierto límite. El incremento de la presión fuerza a una pequeña cantidad de leche a entrar en los conductos mayores y a bajar hacia la cisterna. Sin embargo, la mayor parte de la leche en la ubre está contenida en los alveolos y en los finos capilares del área alveolar. Estos capilares son tan finos que la leche por sí misma no puede fluir libremente a través de ellos. Se necesita ejercer una presión sobre los alveolos para conseguir que la leche salga de ellos y pase por los capilares hasta llegar a los conductos mayores. Las células musculares situadas alrededor de cada alveolo realizan este trabajo mecánico durante el ordeño, tal como como se aprecia en la Figura 1.2.

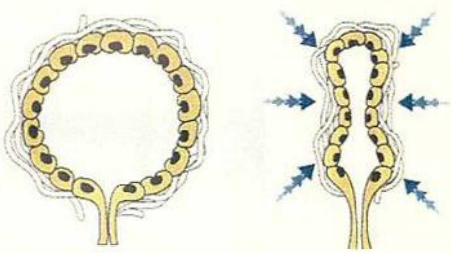


Fig. 1.2 *Extracción de la leche contenida en los alveolos.*

El ciclo de lactación

La secreción de la leche en la ubre de la vaca comienza poco antes del parto, de modo que el ternero pueda empezar a alimentarse casi inmediatamente después de su nacimiento. La vaca, entonces, continúa dando leche durante unos 300 días. Este periodo es conocido como de lactación.

Uno o dos meses despues del parto, la vaca puede ser cubierta otra vez. Durante el periodo de lactación la producción de leche va disminuyendo progresivamente, de forma que tras aproximadamente 300 días puede caer hasta el 15-25% de la producción máxima. En esta etapa el ordeño se detiene para darle a la vaca un período de descanso de hasta 60 días antes de parir de nuevo. Con el nacimiento del ternero comienza un nuevo ciclo de lactación. La primera leche que produce la vaca tras el parto se denomina calostro, y es una leche que difiere en gran manera de la leche normal en cuanto a composición y propiedades. Sobre esto se pueden ver más detalles en el capítulo 2.

Una vaca es normalmente productiva durante unos 5 años. La producción de leche es algo inferior durante el primer periodo de lactación.

Ordeño

Para que se inicie el vaciado de la ubre se debe liberar una hormona llamada oxitocina dentro de la corriente sanguínea de la vaca. Esta hormona es segregada y almacenada en la hipófisis (glándula pituitaria). Cuando la vaca es preparada para el ordeño mediante estímulos apropiados, tiene lugar el envío de una señal a la hipófisis que libera entonces su reserva de oxitocina en la corriente sanguínea.

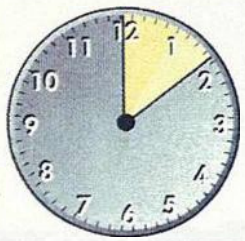


Fig. 1.3 *El ordeño dura 5 - 8 minutos.*

Originariamente, el estímulo en la vaca se producía cuando el ternero comenzaba a mamar, con sus intentos de succionar leche del pezón. La oxitocina es liberada cuando la vaca siente que el ternero está succionando. Una vaca lechera en la actualidad no alimenta a sus terneros, pero está condicionada a reaccionar frente a otros estímulos, tales como los sonidos, olores y otras sensaciones asociadas con el ordeño.

La oxitocina empieza a tener efecto alrededor de un minuto después de comenzar la preparación de la vaca al ordeño, provocando que las células musculares compriman a los alveolos. Esto genera una presión en la ubre que puede sentirse con la mano y que se conoce como el reflejo de bajada de la leche. La presión fuerza a la leche a descender hasta la cisterna del pezón, desde donde es succionada por la pezonera de una ordeñadora mecánica o forzada a salir por presión con los dedos durante el ordeño manual.

El efecto del reflejo de bajada de la leche disminuye con el tiempo, debido a que la oxitocina es diluida y descompuesta en la corriente sanguínea, desapareciendo después de 5-8 minutos. El ordeño debe, por lo tanto, completarse dentro de ese período de tiempo. Si la operación de ordeño se prolonga con objeto de "agotar" a la vaca, se somete la ubre a un esfuerzo adicional innecesario, lo que irrita al animal y puede dificultar su ordeño.

Ordeño manual

En muchas granjas de todo el mundo, aún se realiza el ordeño a mano, del mismo modo como se hacía hace miles de años. Las vacas son normalmente ordeñadas por la misma persona todos los días, y son rápidamente estimuladas para permitir la evacuación (o bajada de la leche) sólo con oír los sonidos familiares de la preparación para el ordeño.

El ordeño comienza cuando la vaca responde con el reflejo de evacuación. La primera leche de los pezones es rechazada, ya que a menudo contiene gran número de bacterias. Mediante un chequeo visual y cuidadoso de esta primera leche es posible apreciar cualquier cambio que pueda indicar que la vaca está enferma.

Los dos cuartos opuestos diagonalmente se ordeñan a la vez. Una mano extrae por presión la leche fuera de la cisterna de un pezón, después de lo cual la presión es disminuida para permitir que entre más leche dentro del pezón desde la cisterna de la ubre. Al mismo tiempo, la leche es presionada hacia fuera del otro pezón, de modo que los dos pezones son ordeñados alternativamente. Cuando los dos cuartos han sido vaciados de este modo, el ordeñador procede entonces a ordeñar los otros dos hasta que la ubre entera es vaciada.

La leche es recogida en cubos que se vierten en cántaras de 30-50 litros, pasando antes por un tamiz para eliminar las impurezas groseras. A continuación, las cántaras se enfrían y se almacenan a baja temperatura a la espera de su transpor-

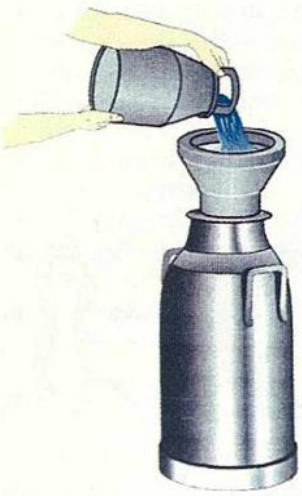


Fig. 1.4 *La leche debe ser filtrada a través de un colador y a continuación enfriada.*

te a la central lechera. Normalmente se utilizan unidades enfriadoras de inmersión o aspersión.

Ordeño mecánico

En las granjas de tamaño mediano o grande con rebaños numerosos la práctica habitual es el ordeño mecánico de las vacas, con un equipo similar al que se muestra en la Figura 1.5. Las máquinas ordeñadoras extraen la leche de la ubre por vacío. El equipo de ordeño consiste en una bomba de vacío, un depósito sometido a vacío que sirve también para recoger la leche, las pezoneras conectadas por mangueras al depósito a vacío y un pulsador que alternativamente aplica vacío y presión atmosférica a las pezoneras.

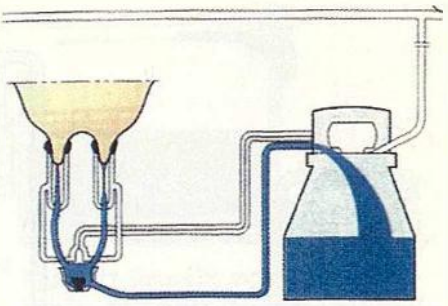


Fig. 1.5 *Equipo de ordeño mecánico.*

Cada pezonera está compuesta de un tubo de acero inoxidable que contiene un tubo interior de goma, llamado manguito de ordeño. El interior del manguito, en contacto con el pezón, está sometido a un vacío constante de unos 0.5 bar (50 % de vacío) durante el ordeño.

La presión en la cámara de pulsación (entre el manguito y la pezonera) es regularmente alternada por el pulsador, entre 0.5 bar durante la fase de succión y la presión atmosférica durante la fase de masaje. De esta manera se consigue que la leche sea extraida de la cisterna del pezón durante la citada fase de succión. Durante la fase de masaje el manguito de la pezonera permanece cerrado para detener la extracción de leche, permitiendo que descienda hacia la cisterna del pezón desde la cisterna de la ubre. Después viene otra fase de succión, y así sucesivamente. La Figura 1.6 muestra ambas fases.

La relajación de la teta durante la fase de masaje es necesaria para evitar la acumulación de sangre y fluido en la misma, lo que sería penoso para la vaca y provocaría la detención de la evacuación (o bajada de la leche). El pulsador alterna las fases de succión y masaje 40 a 60 veces por minuto.

Las cuatro pezoneras, que están unidas a un colector, se colocan en los pezones de la vaca por succión. Durante el ordeño la succión se aplica alternativamente a un par de pezones opuestos diagonalmente y después al otro par. La leche es conducida desde dichos pezones al depósito a vacío o hacia una tubería de transporte a vacío. Una válvula automática de cierre evita que entre suciedad en el sistema si una pezonera se suelta durante el ordeño. Una vez que la vaca ha sido ordeñada, el depósito a vacío se lleva a una sala donde la leche es vaciada en una cántara o en un depósito especial para su enfriamiento.

Para eliminar el pesado y costoso trabajo de llevar los baldes llenos hasta esa sala, se puede instalar un sistema de tuberías para el transporte directo de la leche a la sala por medio de vacío, tal como se ve en la Figura 1.8. Estos sistemas son ampliamente utilizados en las granjas medianas y grandes. De esta forma, la leche puede ser transportada por un sistema cerrado directamente desde la vaca hasta el depósito de recogida en la sala, lo que es una gran ventaja desde el punto de vista bacteriológico. En cualquier caso, es importante que el sistema de tuberías sea diseñado para evitar que entre aire y para tratar la leche de forma cuidadosa.

Las instalaciones de ordeño mecánico también pueden disponer de un sistema automático de limpieza CIP (cleaning-in-place).

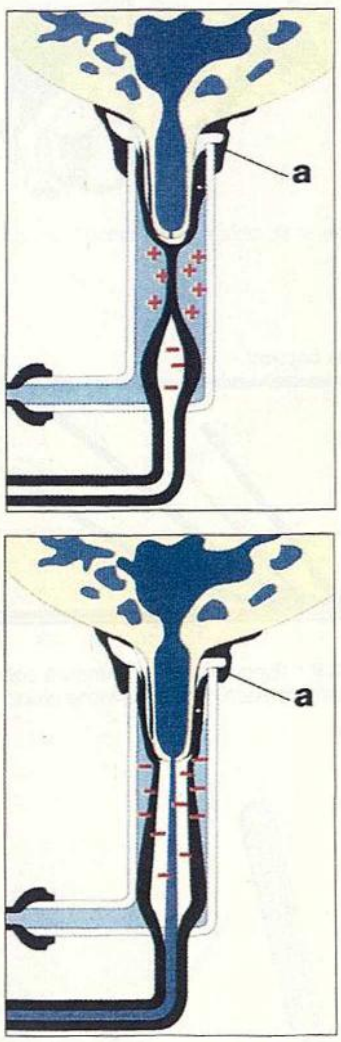


Fig. 1.6 *Fases del ordeño mecánico.*
a. Recubrimiento de la pezonera.

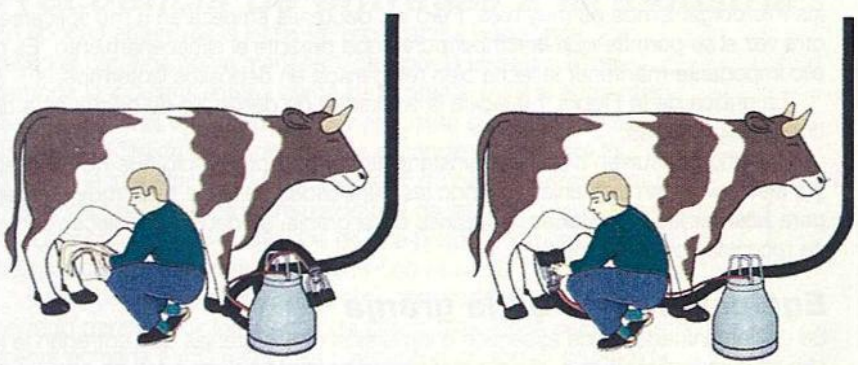


Fig. 1.7 *Preparación de la vaca para el ordeño mediante limpieza y masaje de las ubres antes de colocar las pezoneras en las ubres.*

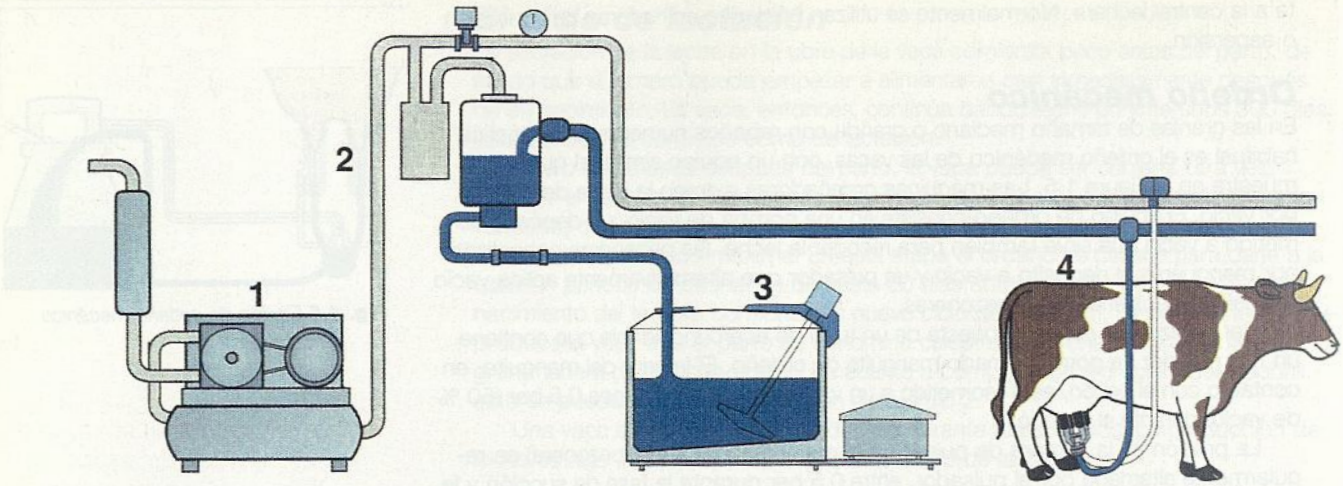


Fig. 1.8 *Diseño general de la línea de ordeño mecánico.*
1. *Bomba de vacío.*
2. *Tubería de vacío.*
3. *Tanque de enfriamiento de la leche.*
4. *Tubería de leche.*

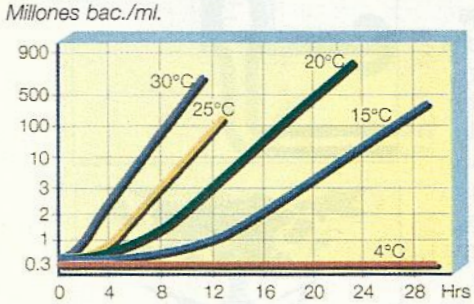


Fig. 1.9 *Influencia de la temperatura sobre el desarrollo bacteriano en la leche cruda.*

Fig. 1.10 *La leche se debe enfriar a 4°C o menos tan pronto como se efectúe el ordeño.*

Enfriamiento de la leche en la granja

La leche abandona la ubre a una temperatura de 37°C. La leche recién ordeñada de una vaca sana está prácticamente libre de bacterias, pero debe ser protegida contra infecciones tan pronto como deja la ubre. Los microorganismos capaces de deteriorar la leche están en todas partes: en las ubres, en las manos del ordeñador, en partículas presentes en el aire, en gotas de agua, en la paja, en los pelos de la vaca y en el suelo. La leche contaminada de esta manera debe ser filtrada.

Se debe prestar una cuidadosa atención a la higiene con objeto de producir leche de alta calidad bacteriológica. Sin embargo, a pesar de todas las precauciones, es imposible excluir completamente la presencia de bacterias. La leche de hecho es un excelente medio de cultivo para las bacterias, ya que contiene todos los nutrientes que ellas necesitan. Por ello, tan pronto como las bacterias contaminan la leche empiezan a multiplicarse. Por otra parte, la leche que sale de los pezones contiene ciertas sustancias bactericidas que la protejen contra la acción de los microorganismos durante un primer período. Además, también les cuesta un cierto tiempo a los microorganismos contaminantes adaptarse al nuevo medio antes de que puedan empezar a desarrollarse.

A menos que la leche sea enfriada, será alterada rápidamente por los microorganismos que se desarrollan y multiplican a mayor velocidad a temperaturas cercanas a 37°C. Por lo tanto, la leche debe ser enfriada con rapidez a unos 4°C inmediatamente después de su ordeño. A esta temperatura el nivel de actividad de los microorganismos es muy bajo. Pero las bacterias empezarán a multiplicarse otra vez si se permite que la temperatura suba durante el almacenamiento. Es por ello importante mantener la leche bien refrigerada en depósitos isotermos.

La gráfica de la Figura 1.9 indica la velocidad de desarrollo de bacterias a distintas temperaturas.

Cuando concurren ciertas circunstancias, como por ejemplo que no haya agua y/o electricidad en la granja o cuando las cantidades de leche sean muy pequeñas para justificar las inversiones necesarias en la granja, se deben establecer centros de recogida cooperativos.

Equipos de frío en la granja

Se utilizan enfriadores de aspersión o inmersión en las granjas que entregan la leche en cántaras metálicas. En el enfriador de aspersión el agua fría en circulación se rocía por el exterior de las cántaras para mantener la leche fría. El enfriador de inmersión consta de un serpentín que se introduce en la cántara. Por dicho serpentín se hace circular agua que mantiene la leche a la temperatura deseada (ver también la Figura 1.19 y la 1.21).

Cuando se utilizan ordeñadoras mecánicas, la leche se recoge en tanques especiales refrigerados (ver Figura 1.11). Estos tanques se construyen en diferentes

tamaños, llevan incorporado un equipo de refrigeración, y son diseñados para garantizar el enfriamiento de la leche hasta una temperatura determinada en un tiempo también determinado. Normalmente, estos depósitos están equipados con sistemas automáticos de limpieza para asegurar un elevado y uniforme nivel de higiene.

En las granjas muy grandes y en los centros de recogida donde grandes volúmenes de leche (mas de 5.000 litros) deben ser enfriados rápidamente desde 37 a 4°C, el equipo de refrigeración incorporado a los depósitos es insuficiente. En estos casos los tanques se utilizan simplemente para mantener la temperatura de almacenamiento requerida. El enfriamiento previo al almacenamiento en este tanque se ha de efectuar en intercambiadores de calor conectados a la tubería de transporte de la leche. La Figura 1.12 muestra un sistema de este tipo.

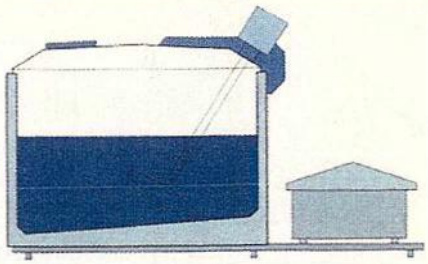


Fig. 1.11 *Tanque de expansión directa usado para el enfriamiento y recogida de la leche.*

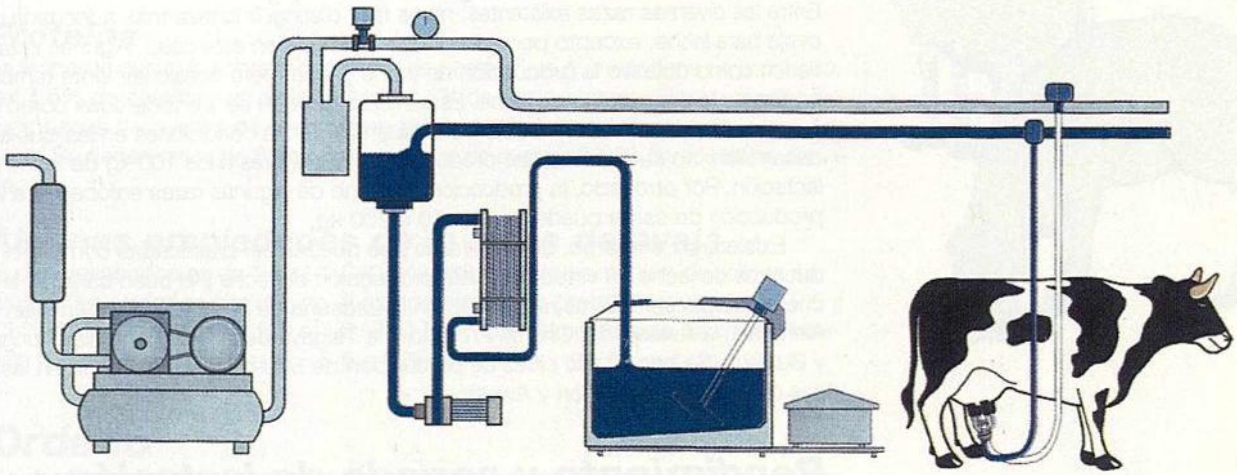


Fig. 1.12 *Equipo de ordeño mecánico en una granja grande, dotado con intercambiador de calor para el enfriamiento rápido de la leche de 37 a 4°C.*

Limpieza y desinfección

La infección de la leche por bacterias es causada en gran medida por el equipo de manejo de la leche. Cualquier superficie en contacto con la leche es una fuente potencial de infección. Por lo tanto, es muy importante limpiar y desinfectar cuidadosamente todo el equipo.

Cuando se practique el ordeño a mano, los utensilios se deben de limpiar a mano con detergentes y cepillos adecuados.

Las instalaciones de ordeño mecánico suelen incorporar sistemas de limpieza automática (CIP), que normalmente disponen de libro de manejo y recomendaciones sobre los detergentes y desinfectantes más adecuados.

Frecuencia de entregas a la industria

En epocas anteriores la leche se entregaba a la industria dos veces al día, una por la mañana y otra por la tarde. En esos tiempos la industria estaba cerca de la granja. Pero al aumentar las dimensiones de las industrias y reducirse su número, sus áreas de recogida se ampliaron y la distancia media entre la granja y la industria también aumentó. Esto ha supuesto el aumento de los intervalos entre recogidas de leche.

La recogida en días alternos es una práctica común, y cada tres o incluso cada cuatro días tampoco es raro.

La leche debe ser preferiblemente manejada en un sistema cerrado para reducir los riesgos de infecciones. Debe ser rápidamente enfriada a 4°C nada más realizado el ordeño, y mantenida a esa temperatura hasta su procesado posterior. Todos los equipos en contacto con la leche deben limpiarse y desinfectarse.

Los problemas de calidad pueden aumentar si los intervalos entre recogidas son demasiado largos. Ciertos tipos de microorganismos, conocidos como psicrotróficos, pueden crecer y reproducirse por debajo de +7°C. Esto ocurre principalmente en

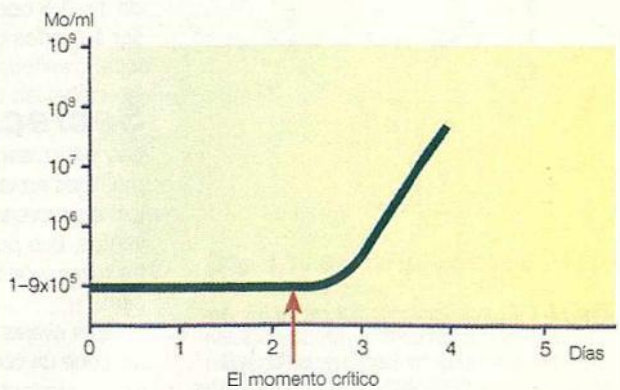
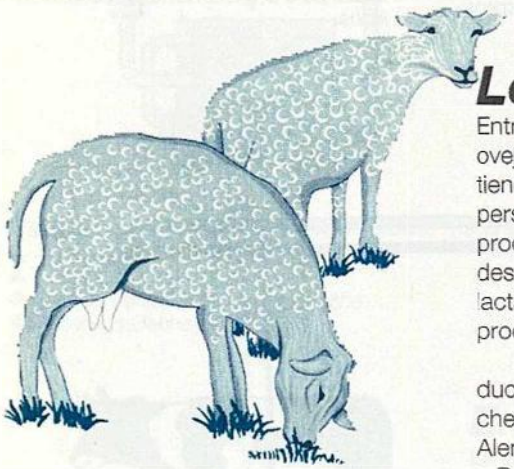


Fig. 1.13 Crecimiento bacteriano a +4°C en la leche cruda.

el suelo y en el agua, por lo que es importante que el agua utilizada en limpieza sea de buena calidad bacteriológica.

Las bacterias psicrotróficas crecerán en la leche cruda almacenada a +4ºC. Tras un periodo de aclimatación de 48-72 horas, el crecimiento tiene lugar según una intensa fase logarítmica, tal como se ve en la Figura 1.13. Esto da lugar a la descomposición de la grasa y las proteinas, produciéndose malos olores que podrían estropear la calidad de los productos fabricados con esta leche.

Este fenómeno debe prevenirse mediante un adecuado plan de recogidas de leche. Si no se pueden evitar los intervalos largos, entonces es aconsejable enfriar la leche hasta 2-3ºC.



Leche de oveja

Entre las diversas razas existentes, no es fácil distinguir la raza más adecuada de oveja para leche, excepto por el fín que se persigue en este caso. Algunas razas tienen como objetivo la producción de carne y lana, pero ocasionalmente también persiguen la producción de leche. Estas razas pueden ser consideradas como de producción de leche, pero como consecuencia de las condiciones en las que se desarrollan, no suelen alcanzar producciones superiores a los 100 kg de leche por lactación. Por otro lado, la producción de leche de algunas razas enfocadas a la producción de carne puede ser de 150 a 200 kg.

Existen, sin embargo, algunas razas que pueden ser clasificadas como productoras de leche en virtud de la alta producción de leche y el buen carácter lechero que poseen. Estas razas incluyen la Lacaune de Francia, la East Friesian de Alemania, la Awassi del Oriente Próximo y la Tsigaya de la CIS, Rumanía, Hungría y Bulgaria. Se han citado cifras de producción de 500 a 650 kg de leche en las razas de oveja East Friesian y Awassi.

Rendimiento y período de lactación

Los datos de rendimiento y períodos de lactación dados por diferentes autores muestran un amplio abanico entre las distintas razas, así como dentro de la misma raza. Por lo anterior, las cifras de 0.4 a 2.3 kg por oveja y día y 100 a 260 días por período de lactación pueden ser considerados como referencia de las medias más altas y más bajas.

Tamaño del rebaño

Se estima que, en general, de 8 a 10 ovejas lecheras podrían equivaler a una vaca. Por lo anterior, un rebaño de 150 a 200 ovejas sería un tamaño adecuado para una explotación familiar intensiva, mientras que los tamaños de 300 a 400 ovejas sería lo apropiado para una unidad de producción.

Una empresa grande podría tener miles de ovejas, pero el número de ovejas lecheras no debería exceder de 1.200 ya que el ordeño necesita bastante mano de obra. La eficiencia de la instalación de ordeño y la capacidad de trabajo de la sala son de suma importancia, así como la calidad de gestión y las condiciones topográficas.

Una oveja se suele mantener durante cinco años en el rebaño. El período de gestación es alrededor de cinco meses, y la mayoría de las razas dan una media de 1 a 1.5 corderos al año (en áreas pobres menos de uno). Las ovejas pueden ser cubiertas desde la edad de 12 a 13 meses.

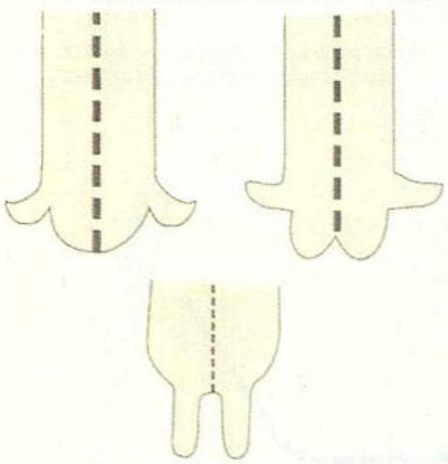


Fig. 1.14 *Localizaciones típicas de los pezones en las ubres de la oveja. La posición ideal sería cuando los pezones se localizan en los puntos más bajos de las dos mitades de la ubre.*

Secreción de la leche

Las ovejas segregan la leche de la misma manera que el resto de animales domésticos en lactación. La composición de la leche de oveja también es similar. La leche de oveja se distingue unicamente en el porcentaje de los distintos constituyentes, que puede variar entre las distintas especies de animales domésticos, entre razas y dentro de la misma raza, entre individuos y según el período de lactación.

Las ovejas producen calostro durante los primeros días tras el parto. El calostro tiene un contenido de materia seca de hasta el 40% y contiene las proteinas más importantes, α-lactoalbúmina y β-lactoalbúmina en cantidades de hasta el 16% o incluso más. El período de producción de calostro normalmente dura unos

3-4 días, durante los cuales la composición del calostro cambia gradualmente, pasando a ser cada vez más similar a la leche normal. El calostro no es útil a las lecherías, por lo que no se debe llevar a éstas.

Como se puede ver en la Tabla 1.1, la leche de oveja es más rica en todos los constituyentes que la leche de vaca, presentando hasta un 30% más de materia seca.

Grasa de la leche

Los glóbulos grasos de la leche de oveja tienen un tamaño comprendido entre 0.5 y 25 micras, aunque la fracción mayor está entre 3 y 8 micras, lo que significa que tienen casi dos veces el tamaño de los glóbulos de grasa de la leche de vaca. La grasa de la leche de oveja contiene sensiblemente más ácidos grasos caprílico y cáprico que la grasa de leche de vaca. Esta es la razón del gusto y aroma característicos de la leche y los productos derivados de la leche de oveja.

Proteina

La leche de oveja es sobre todo "leche de caseina" ya que contiene un promedio del 4.5% de caseina y sólo alrededor del 1% de seroproteinas. El ratio caseina/seroproteinas de la leche de oveja difiere por tanto del que se observa en la leche de vaca. Se tienen ratios de 82:18 para la leche de oveja y 80:20 para la leche de vaca.

Algunas propiedades de la leche de oveja

El peso específico es de 1.032-1.040 g/l debido al alto contenido de sólidos no grasos. La acidez es alta debido al alto porcentaje de proteinas y varía entre 9.6 y 12 °SH. (leche de vaca = 6.5 a 7.2 °SH.) El pH normalmente está dentro del intervalo 6.5 a 6.8 (leche de vaca = 6.5 a 6.7).

Ordeño

Se debe remarcar que existe una gran diferencia de rendimiento entre las vacas y las ovejas. Mientras que la vaca tiene una ubre de cuatro cuartos, teniendo cada uno de ellos un pezón, dispuesto normalmente de forma vertical, la oveja tiene una ubre de dos mitades, cada una con un pezón.

Mientras que la vaca es fácil de ordeñar, tanto manual como mecánicamente, la oveja es más difícil de ordeñar satisfactoriamente debido a que los pezones de muchas razas e individuos están orientados horizontalmente. Una ubre ideal es aquella que tiene los pezones dispuestos en la parte más baja de las dos mitades de la ubre. La Figura 1.14 muestra ejemplos de varias configuraciones de la ubre de oveja.

Algunas razas tienen un pequeño porcentaje de leche de cisterna (Figura 1.15), y los resultados del ordeño dependen en gran parte de lo bien que se realice el reflejo de evacuación (o bajada de la leche).

Como ocurre con las vacas, la segregación de la leche es iniciada por la hormona oxitocina, que provoca la acción de las células musculares que presionan los alveolos. Esto genera una turgencia en la ubre, que se corresponde con el fenómeno de reflejo de evacuación. Este reflejo tiene lugar en la oveja sólo durante un corto período de tiempo, que puede ser hasta de 2 minutos (frente a 8 minutos en la vaca) dependiendo de la raza y el estado de lactación. El período de ordeño es por lo tanto corto.

Ordeño a mano

Al parecer el ordeño a mano es el método más utilizado en las pequeñas granjas familiares. El rendimiento en el ordeño es mucho más dependiente del reflejo de evacuación. A modo de ejemplo se cita que se han comprobado los siguientes rendimientos: un buen ordeñador podría ser capaz de ordeñar en una hora hasta 20-40 ovejas con reflejo de evacuación lento (como la raza Laucane), mientras que el mismo ordeñador podría ordeñar a mano de 40 a 100 ovejas por hora con reflejo de evacuación corto (como la raza Manech).

Ordeño mecánico

Las granjas de leche con más de 150 ovejas generalmente instalarán sistemas de ordeño mecánico para eliminar mano de obra de ordeño. Sin embargo, no todos los equipos de ordeño mecánico son deseables para las ovejas.

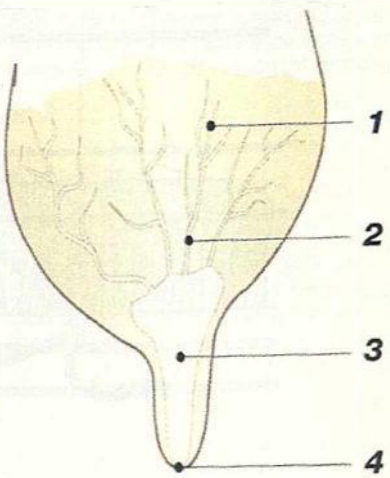


Fig. 1.15 *Sección transversal de una mitad de una ubre de oveja.*
1. *Tejido alveolar.*
2. *Conductos de leche.*
3. *Cisterna de la ubre.*
4. *Cisterna del pezón.*

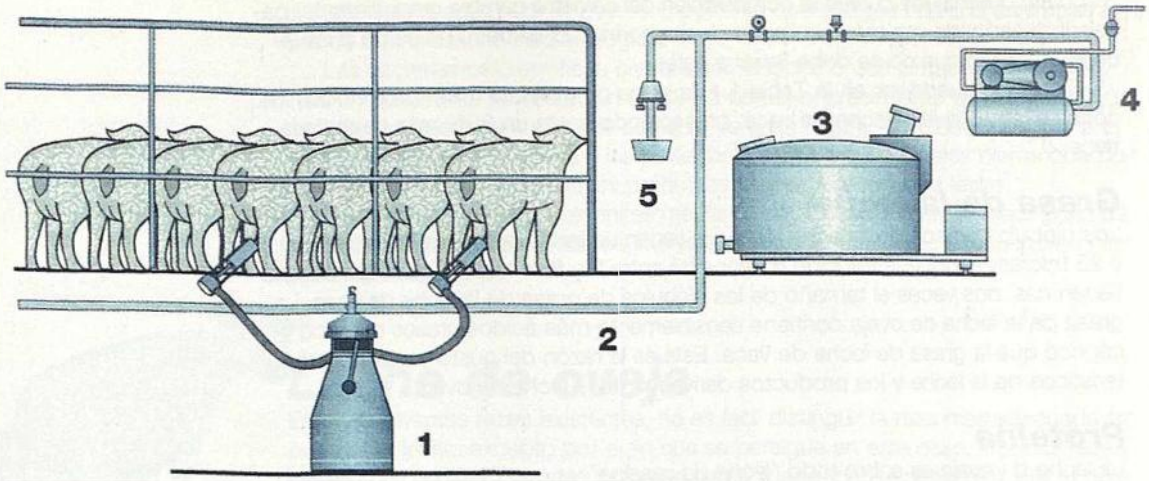


Fig. 1.16 *Sistema de ordeño con cántara.*
1. *Cántara de leche con pulsador.*
2. *Línea de vacío.*
3. *Tanque de leche para recogida y enfriamiento.*
4. *Bomba de vacío.*
5. *Unidad de limpieza de las pezoneras.*

El principio de trabajo de los equipos de ordeño mecánico para ovejas es similar que el descrito para las vacas.

Los tipos más comunes de instalaciones de ordeño mecánico son el de cántara, el de tuberías fijas y el tipo móvil (ver las Figuras 1.16, 1.17 y 1.18).

En la *instalación de cántara* el sistema de vacío es fijo y la unidad de cántara es móvil. La cántara, que tendrá una capacidad de 15 a 20 litros, se utiliza para el transporte manual de la leche hasta el tanque de almacenamiento.

El pulsador o relé de pulsación se puede montar sobre la tapa de la cántara. Una válvula antirretorno en la tapa permitirá que salga el aire succionado.

Una instalación de este tipo puede tener hasta tres cántaras por operador. La capacidad normal de un operador con dos cántaras es de 70 ovejas por hora. Este tipo de instalaciones es recomendable para pequeños rebaños de hasta 140 animales.

En una *instalación de tuberías* fijas la línea de leche puede ser instalada en un nivel más alto o más bajo que el nivel de la sala. La capacidad de ordeño mecánico depende del diseño de la sala.

La *unidad de ordeño mecánico móvil* es recomendable para pequeños rebaños y para la realización del ordeño en el campo, y cuando las ovejas deban ser ordeñadas en diferentes sitios. La instalación tiene la misma capacidad que una instalación del tipo de cántara.

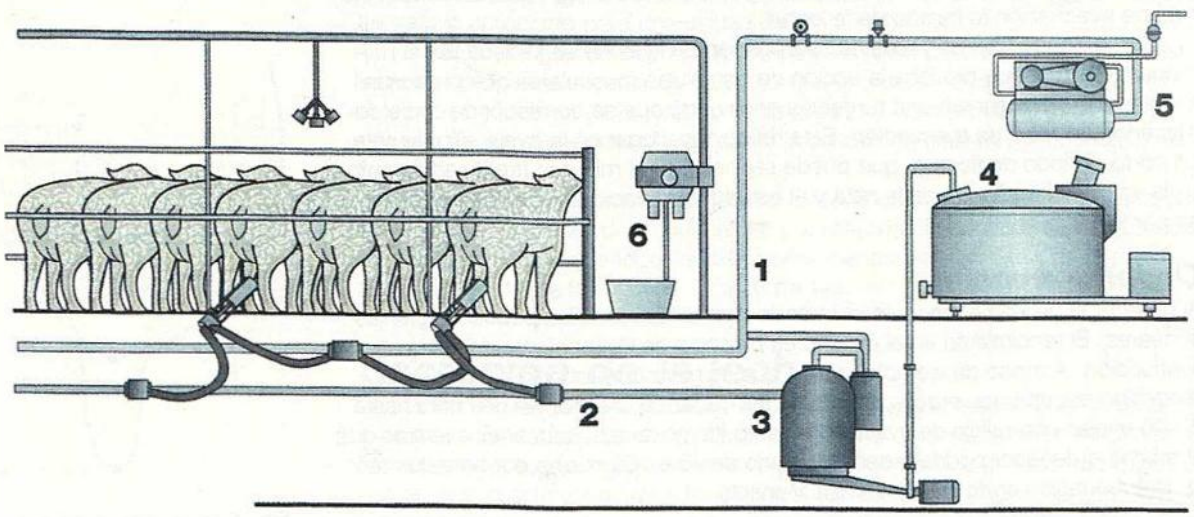


Fig. 1.17 *Sistema de ordeño con tuberías.*
1. *Tubería de leche.*
2. *Tubería de vacío.*
3. *Unidad final.*
4. *Tanque de recogida y enfriamiento de la leche.*
5. *Bomba de vacío.*
6. *Unidad de limpieza de las pezoneras.*

La unidad está constituida por un sistema completo de producción de vacío, una unidad de potencia (motor eléctrico o de combustión), un conjunto de pezoneras, un depósito de leche para 20-50 litros y un sistema de pulsación, todo montado sobre un carrito de ruedas.

Durante el ordeño esta unidad se coloca detrás de cuatro a ocho ovejas. Las dos barras pivotantes se vuelven hacia fuera detrás de las ovejas, y las pezoneras se acoplan por detrás.

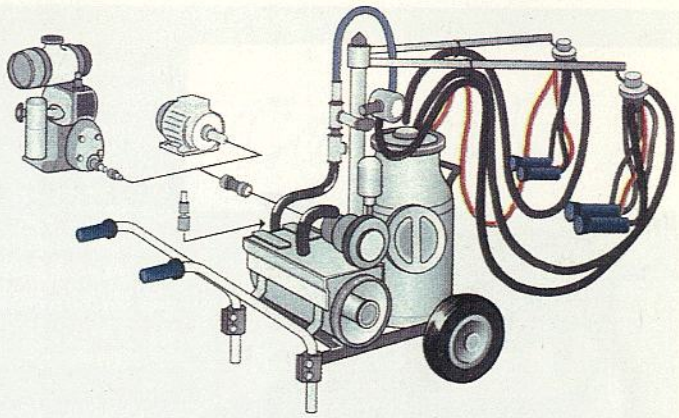


Fig. 1.18 *Unidad de ordeño móvil.*

Enfriamiento de la leche

El enfriamiento eficiente de la leche tras el ordeño es la mejor manera de prevenir el crecimiento bacteriano. Se pueden utilizar varios sistemas de enfriamiento. La elección depende del volumen de producción de leche. El equipo se puede utilizar también para leche de vaca y de cabra.

Un enfriador sumergible en la cántara, como el que se muestra en la Figura 1.19, es adecuado para pequeños productores. Puede ser interesante para usuarios de unidades de agua fría y productores que utilizan equipos de ordeño que llevan la leche directamente a la cántara.

El enfriador de inmersión se ha diseñado para el enfriamiento directo de la leche en cántaras así como en tanques. La unidad condensadora se monta sobre la pared, tal como se ve en la Figura 1.20.

El evaporador se dispone en el extremo más bajo de la unidad de inmersión.

El enfriador de inmersión se puede utilizar también para enfriamiento indirecto, por ejemplo, para enfriamiento de agua en tanques aislados. La leche es entonces enfriada en las cántaras de transporte sumergidas en agua fría.

Los tanques de granja aislados para utilizar los enfriadores por inmersión pueden ser de tipo fijo o móvil, tal como se ve en la Figura 1.21. Cuando las condiciones de la carretera impiden el acceso del camión de recogida, se puede utilizar un tanque móvil para llevar la leche hasta el punto de recogida de la leche. Los tanques móviles son fáciles de transportar por lo que se recomiendan para el ordeño en el campo.

Los tanques de expansión directa (Figura 1.11) se pueden utilizar también para el enfriamiento y el almacenamiento de la leche.

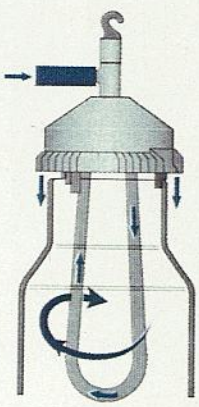


Fig. 1.19 *Un enfriador sumergido se coloca como tapa en la cántara de leche o en cualquier otro tipo de envase de recogida.*

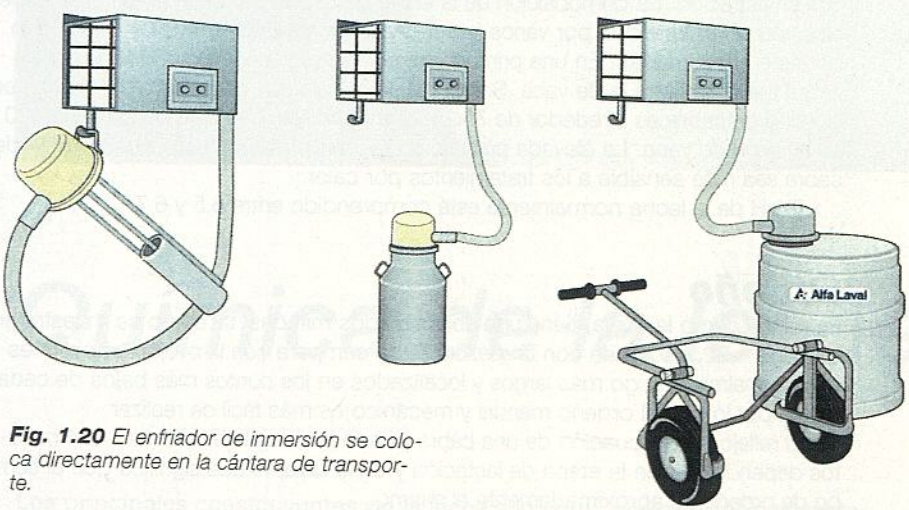


Fig. 1.20 *El enfriador de inmersión se coloca directamente en la cántara de transporte.*

Fig. 1.21 *El tanque aislado de la granja puede llenarse en el campo y ser transportado facilmente hasta la unidad de enfriamiento.*

Limpieza y desinfección

La infección por bacterias de la leche se suele producir sobre todo como consecuencia del manejo de equipos sucios. Cualquier superficie en contacto con la leche es una fuente potencial de infección.

La limpieza manual con cepillos es un método común.

La limpieza automática por circulación de los productos de limpieza se emplea normalmente en las instalaciones de ordeño mecánico. La solución de limpieza se hace circular a lo largo de toda la instalación mediante vacío y/o bombeo.

Los detergentes y desinfectantes apropiados así como las temperaturas recomendadas para limpieza y desinfección vienen normalmente dadas por los suministradores de las instalaciones de ordeño mecánico.

Leche de cabra

La cabra fué probablemente el primer rumiante que se domesticó. Es originaria de Asia y actualmente está extendida por todo el mundo. Las cabras son animales muy rústicos, capaces de vivir en zonas donde otros animales tendrían muchas dificultades. A diferencia de las ovejas, las cabras no son animales de rebaño.

Existen numerosas razas de cabra, y es difícil de distinguir una raza particularmente orientada a la producción de leche. Sin embargo, la raza Suiza (Saana, Toggenburg, Chamois) ha sido seleccionada con éxito y criada por su buen rendimiento lechero. Estas cabras se exportan a todo el mundo para mejorar el rendimiento lechero de las razas autóctonas.

Las razas no lecheras que merecen una mención especial son la Cachemir y Angora, que son bien conocidas por la lana que producen.

Rendimiento y período de lactación

En una unidad bien manejada de producción de leche, una cabra puede producir entre 400 y 900 kg de leche por lactación. El período de lactación varía de 200 a 300 días.

El duro y tedioso trabajo de ordeño a mano se facilita mediante el ordeño mecánico, pero se ha de tener una producción mínima que justifique la mecanización. Para una granja familiar de cabras, se han de tener unas 40-120 cabras para conseguir un rendimiento aceptable. Una empresa requiere un gran número de animales, de 200 a 1.000 cabras. Una unidad de producción intensiva y factible, con un tamaño familiar o de empresa, necesita no sólo un equipo apropiado de ordeño mecánico sino también una gestión efectiva, y unos buenos programas de manejo y alimentación.

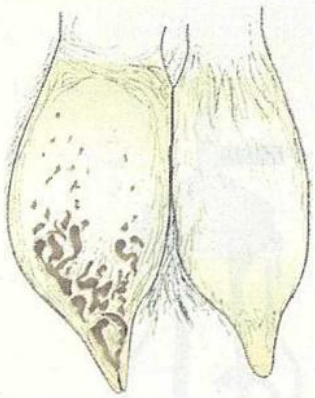


Fig. 1.22 *Forma de las ubres de las cabras.*

Secreción de leche

Las cabras segregan la leche de la misma manera que los otros animales domésticos en lactación. La composición de la leche de cabra, como en el resto de especies, viene determinada por varios factores. Las cifras dadas en la Tabla 1.1 son por ésto aproximadas. En una primera aproximación parece como si la leche de cabra fuera similar a la de vaca. Sin embargo, la relación caseina/seroproteinas en la leche de cabra es alrededor de 75:25, que contrasta bastante con la de 80:20 de la leche de vaca. La elevada proporción de seroproteinas hace que la leche de cabra sea más sensible a los tratamientos por calor.

El pH de la leche normalmente está comprendido entre 6.5 y 6.7.

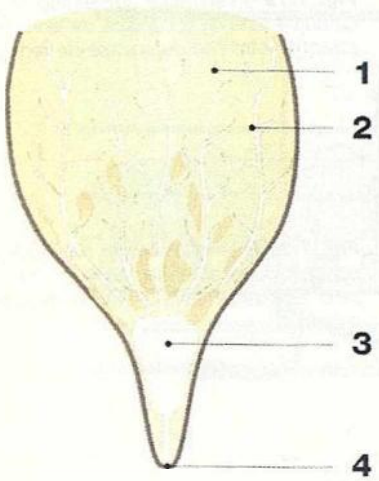


Fig. 1.23 *Sección transversal de una mitad de la ubre de la cabra.*
1. *Tejido alveolar.*
2. *Conductos de leche.*
3. *Cisterna.*
4. *Canal del pezón.*

Ordeño

La cabra, como la oveja, tiene una ubre con dos mitades, tal como se muestra en la Figura 1.22, cada una con un pezón. Si se compara con la oveja, los pezones son normalmente algo más largos y localizados en los puntos más bajos de cada mitad, por lo que el ordeño manual y mecánico es más fácil de realizar.

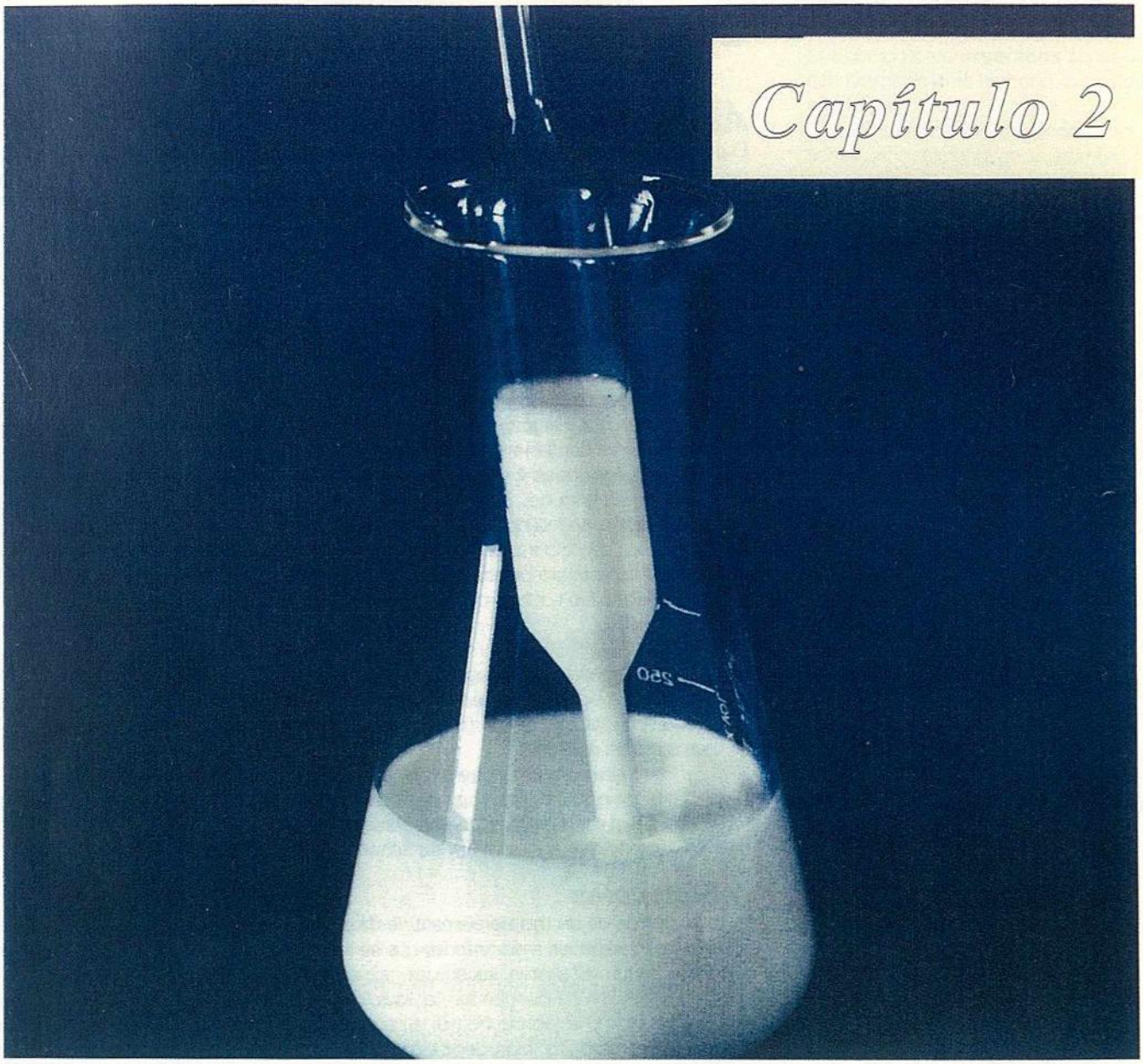
El reflejo de evacuación de una cabra puede prolongarse durante 1 a 4 minutos dependiendo de la etapa de lactación y de la raza, lo que significa que el tiempo de ordeño es aproximadamente el mismo.

Ordeño a mano

El ordeño a mano es la forma común de ordeño de la cabra.

Ordeño mecánico, enfriamiento y almacenamiento

El ordeño mecánico facilita enormemente el trabajo en las granjas grandes de cabras. La información suministrada anteriormente sobre el equipamiento para la oveja, de ordeño mecánico, enfriamiento de la leche, limpieza y almacenamiento, sería también de aplicación para la mayoría de las cabras.



Capítulo 2

Química de la leche

Los principales constituyentes de la leche son agua, grasa, proteínas, lactosa (azúcar de la leche) y sales minerales. La leche también contiene trazas de otras sustancias tales como pigmentos, enzimas, vitaminas, fosfolípidos (sustancias con propiedades lipídicas), y gases.

El residuo que queda cuando el agua y los gases son eliminados se llama extracto seco (ES, o materia seca) o contenido de sólidos totales de la leche.

La leche es un producto muy complejo. Con objeto de describir sus distintos constituyentes y cómo se ven afectados por las diferentes etapas de procesado en la industria láctea es necesario recurrir a la terminología química. Por lo tanto, este capítulo sobre la química de la leche comienza con una breve revisión de algunos conceptos básicos de química.

Conceptos básicos de química

Átomos

El átomo es el más pequeño constituyente de toda la materia en la naturaleza y no puede ser dividido químicamente. Una sustancia en la que todos sus átomos son del mismo tipo se le llama elemento. En la actualidad se conocen más de 100 elementos. Como ejemplos se tienen el oxígeno, el carbono, el cobre, el hidrógeno y el hierro. Sin embargo, la mayor parte de las sustancias naturales están compuestas de varios elementos diferentes. El aire, por ejemplo, es una mezcla de oxígeno, nitrógeno, anhídrido carbónico y otros gases, mientras que el agua es un compuesto quimico de los elementos hidrógeno y oxígeno.

El núcleo del átomo consta de protones y neutrones (ver Figura 2.1). Los protones son de carga positiva, mientras que los neutrones son eléctricamente neutros. Los electrones, que giran alrededor del núcleo, llevan una carga negativa igual y opuesta a la carga unidad de los protones.

Un átomo contiene el mismo número de protones que de electrones, con lo cual las cargas positivas y negativas son también iguales. El átomo es, por lo tanto, eléctricamente neutro.

Un átomo es muy pequeño (ver Figura 2.2). Hay tantos átomos en una pequeña moneda de cobre como segundos en mil billones de años. Incluso así, un átomo está compuesto principalmente de espacio vacío. Si consideramos que el diámetro del núcleo es 1, el diámetro del átomo entero es de alrededor de 10.000.

Los símbolos químicos de algunos elementos comunes de la materia orgánica son:

C	Carbono	N	Nitrógeno
Cl	Cloro	Na	Sodio
H	Hidrógeno	O	Oxígeno
I	Iodo	P	Fósforo
K	Potasio	S	Azufre

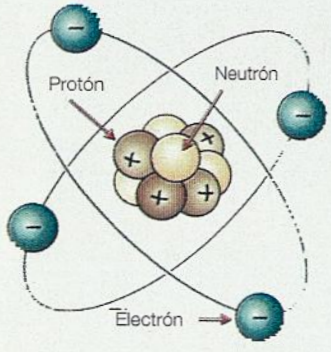


Fig. 2.1 *El núcleo del átomo consta de protones y neutrones. Los electrones están en órbitas alrededor del núcleo.*

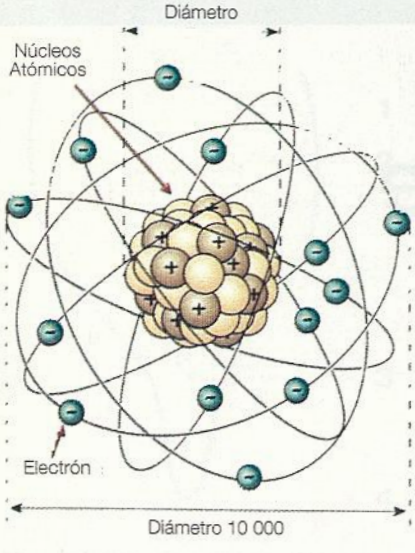


Fig. 2.2 *El núcleo es tan pequeño en relación al tamaño del átomo que si se considera que tiene el tamaño de una pelota de tenis, el electrón más lejano se encontraría a 325 m del centro.*

Iones

Un átomo puede perder o ganar uno o más electrones. Un átomo en esas condiciones ya no es eléctricamente neutro. Se le llama ión. Si el ión contiene más electrones que protones su carga es negativa, pero si ha perdido uno o más electrones su carga es positiva.

Los iones positivos y negativos se encuentran siempre presentes al mismo tiempo; por ejemplo, en soluciones como cationes (carga positiva) y como aniones (carga negativa) o en forma sólida como sales. La sal común está formada por iones de sodio (Na) y de cloro (Cl) y su fórmula es NaCl (cloruro sódico).

Moléculas

Los átomos de un mismo elemento o de diferentes elementos pueden combinarse formando unidades más grandes que se llaman moléculas. Las moléculas pueden entonces formar sustancias sólidas, por ejemplo hierro (Fe) o arena de silíceo (SiO_2). También se pueden formar liquidos, como por ejemplo el agua (H_2O), o gases tales como el hidrógeno (H_2). Si la melécula está constituida principalmente de átomos de carbono, hidrógeno y nitrógeno, entonces el compuesto formado se dice que es orgánico. Un ejemplo es el ácido láctico ($C_3H_6O_3$). Esta fórmula quiere decir que la molécula está compuesta de tres átomos de carbono, seis átomos de hidrógeno y tres átomos de oxígeno.

El número de átomos en una molécula puede variar mucho. Hay moléculas compuestas de dos átomos unidos y otras compuestas de cientos de átomos.

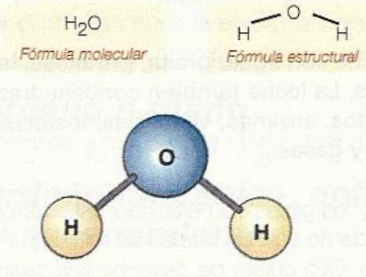


Fig. 2.3 *Tres maneras de representar una molécula de agua.*

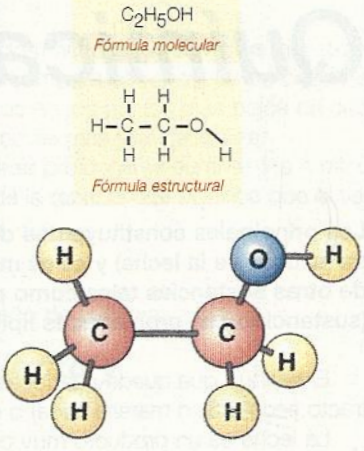


Fig. 2.4 *Tres maneras de representar una molécula de alcohol etílico.*

Propiedades fisicoquímicas básicas de la leche de vaca

La leche de vaca está compuesta en un 87% de agua y el resto es materia seca. La materia seca está suspendida o disuelta en el agua. Dependiendo del tipo de sólido de que se trate existen diferentes sistemas de distribución del mismo en la fase acuosa.

Los compuestos **orgánicos** contienen principalmente carbono, oxígeno e hidrógeno.
Los compuestos **inorgánicos** contienen principalmente otros átomos.

Tabla 2.1
Características fisicoquímicas de la leche.

	Composición media %	Emulsión tipo aceite/agua	Suspensión/ solución coloidal	Solución verdadera
Humedad	87.0			
Grasa	4.0	X		
Proteínas	3.5		X	
Lactosa	4.7			X
Cenizas	0.8			X

Fig. 2.5 *Cuando la leche y nata se convierten en mantequilla, tiene lugar una inversión de fases desde una emulsión aceite-en-agua a una emulsión de agua-en-aceite.*

Definiciones

Emulsión: es una suspensión de gotitas de un líquido en otro. La leche es una emulsión de grasa en agua, la mantequilla es una emulsión de agua en grasa. El líquido finamente dividido se correspondería con la fase dispersa y el otro constituiría la fase continua.

Solución coloidal: cuando una sustancia existe en un estado de división intermedio al de una verdadera solución (por ejemplo, de azúcar en agua) y una suspensión (por ejemplo, yeso en agua) se dice que se trata de una solución coloidal o suspensión coloidal. Las características típicas de un coloide son:

- pequeño tamaño de partícula
- carga eléctrica y
- afinidad de las partículas con las moléculas de agua.

En la leche las seroproteinas están en solución coloidal y la caseina en suspensión coloidal.

Las sales desestabilizan los sistemas coloidales ya que producen el cambio de las uniones con el agua, reduciendo la solubilidad de las proteinas. También pueden provocar la desestabilización de esta solución coloidal otros factores como el calor, que da lugar al desplegado de las seroproteinas e incrementan la interacción entre las proteinas, o el alcohol que puede actuar deshidratando también las partículas.

Tabla 2.2
Tamaños relativos de las partículas de la leche.

Tamaño (mm)	Tipo de partículas
10^{-2} a 10^{-3}	Glóbulos de grasa
10^{-4} a 10^{-5}	Fosfatos cálcicos de caseina
10^{-5} a 10^{-6}	Seroproteínas
10^{-6} a 10^{-7}	Lactosa, sales y otras sustancias en solución verdadera.

Ref. A Dictionary of Dairying by J. G. Davis

Soluciones verdaderas: Las sustancias que cuando se mezclan con el agua u otros líquidos forman verdaderas soluciones, se dividen en:

- soluciones no iónicas. Como cuando la lactosa está disuelta en agua, donde no tienen lugar cambios importantes en la estructura molecular de la lactosa.

Fig. 2.6 *Las proteínas de la leche se pueden hacer visibles por medio de un microscopio electrónico.*

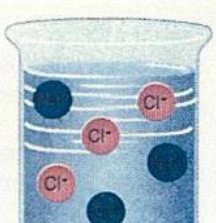


Fig. 2.7 *Solución iónica.*

- soluciones iónicas. Como cuando la sal común se disuelve en agua, los cationes (Na^+) y aniones (Cl^-) están dispersos en el agua, formando un electrolito.

Acidez de las soluciones

Cuando un ácido (ácido clorhídrico, por ejemplo) se mezcla con agua desprende iones de hidrógeno (protones) con carga positiva (H^+). Estos iones rapidamente atacan las moléculas de agua formando iones hidrónio (H_3O^+).

Cuando se añade una base (un óxido metálico o hidróxido) al agua, se forma una solución básica o alcalina. Cuando la base se disuelve desprende iones hidróxido (OH^-). Ver Figura 2.8.

- Una solución que contiene igual número de iones OH^- y de iones hidrónio H_3O^+ es neutra.
- Si la solución contiene más iones OH^- que iones H_3O^+ es alcalina. Ver Figura 2.9.
- Una solución que contiene más iones H_3O^+ que iones OH^- es ácida. Ver Figura 2.10.

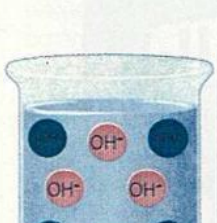


Fig. 2.8 *Solución neutra con pH 7.*

pH

La acidez de una solución se determina como la concentración de iones H_3O^+. Sin embargo, esto varía mucho de una solución a otra. El símbolo pH es utilizado para representar la concentración de iones hidronio. Matemáticamente, el pH es definido como el logaritmo negativo en base diez de la concentración de iones hidronio expresada como molaridad, es decir, $pH = -\log [H^+]$.

Según esto, se tendría la siguiente escala a 25°C:

$pH > 7$ solución alcalina

$pH = 7$ solución neutra

$pH < 7$ solución ácida

Fig. 2.9 *Solución alcalina con pH superior a 7*

Neutralización

Cuando un ácido se mezcla con una base los iones hidrónio e hidróxido reaccionan entre sí para formar agua. Si el ácido y la base se mezclan en unas determinadas proporciones, la mezcla resultante será neutra, sin exceso de iones de ningún tipo y con un pH de 7. Esta operación se llama neutralización y su fórmula química es

$$H_3O^+ + OH^- \text{ da lugar a } H_2O + H_2O$$

La neutralización da como resultado la formación de una sal. Cuando se mezcla ácido clorhídrico (HCl) con hidróxido sódico (NaOH), reaccionan formando cloruro sódico (NaCl) y agua (H_2O). Las sales de ácido clorhídrico se llaman cloruros y las sales de otros ácidos se nombran siguiendo la misma nomenclatura: el ácido cítrico forma citratos, el ácido nítrico forma nitratos, y asi sucesivamente.

Fig. 2.10 *Solución ácida con pH menor que 7.*

Difusión

Las particulas presentes en una solución (iones, moléculas o coloides) se ven influenciadas por fuerzas que las obligan a migrar (difundirse) desde areas de alta concentración hacia áreas de baja concentración. El proceso de difusión continúa hasta que la solucion entera es homogénea, con la misma concentración en todos sus puntos.

El azúcar disuelto en una copa de café, es un ejemplo de difusión. El azúcar se disuelve rápidamente en la bebida caliente y las moléculas de azúcar se difunden hasta que están uniformemente distribuidas por toda la bebida.

La velocidad de difusión depende de la velocidad de las partículas, que a su vez depende de la temperatura, del tamaño de las partículas y de la diferencia de concentraciones entre los distintos puntos de la solución.

La Figura 2.11 ilustra el principio del proceso de difusión. El tubo en U se divide en dos partes mediante una membrana permeable. El lado izquierdo se llena entonces con agua y el derecho con una solución de azúcar cuyas moléculas pueden pasar a través de la membrana. Al cabo de un rato, debido a la difusión, la concentración se iguala en ambas caras de la membrana.

Osmosis

Osmosis es el término utilizado para describir el flujo espontáneo de agua pura en una solución acuosa, o desde una solución menos concentrada hacia una solución más concentrada, cuando se separan ambas soluciones mediante una membrana adecuada. El fenómeno de la ósmosis puede ser ilustrado por el ejemplo que se muestra en la Figura 2.12. Los tubos en U son divididos en dos compartimentos mediante una membrana semi-permeable. El lado izquierdo se llena con agua y el derecho con una solución azucarada cuyas moléculas no pueden atravesar la membrana. En este caso las moléculas de agua se difundirán a través de dicha membrana hacia el lado de la solución de azúcar, diluyéndola y bajando su concentración. Este proceso se denomina ósmosis.

El volumen de la solución azucarada aumenta cuando se la diluye. El nivel de la solución se eleva como se ve en la Figura 2.12, y la presión hidrostática, **a**, de la solución sobre la membrana pasa a ser mayor que la presión del agua en el otro compartimento. En este estado de desequilibrio, las moléculas de agua vuelven a difundirse en sentido contrario bajo la influencia de esa mayor presión hidrostática en la solución. Cuando la difusión de agua en ambas direcciones es igual, el sistema está en equilibrio.

Si inicialmente se aplica una presión hidrostática sobre la solución azucarada, la entrada de agua a través de la membrana puede ser reducida. La presión hidrostática necesaria para evitar el equilibrio de concentración por difusión del agua hacia la solución azucarada se llama presión osmótica de la solución.

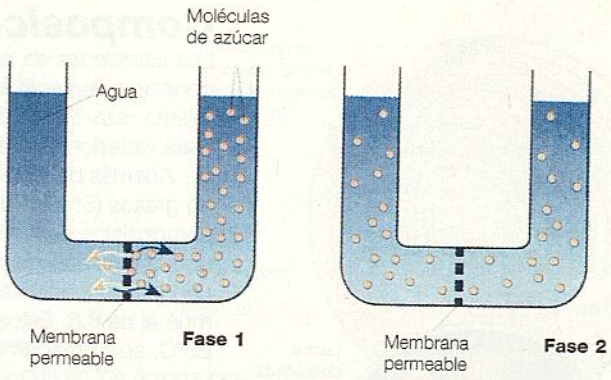


Fig. 2.11 *Las moléculas de azúcar se difunden a través de la membrana y las moléculas de agua se difunden en dirección contraria con el fin de igualar la concentración de la solución.*

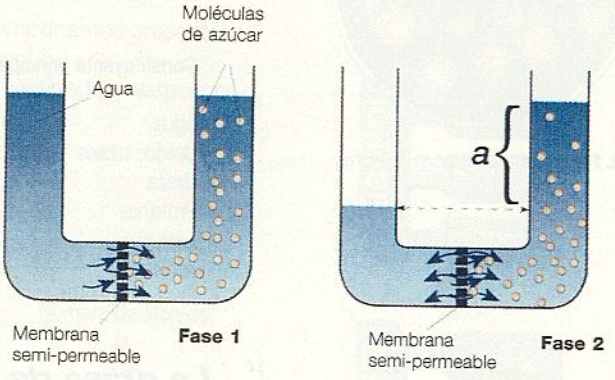


Fig. 2.12 *Las moléculas de azúcar son demasiado grandes para difundirse a través de la membrana semi-permeable. Sólo las pequeñas moléculas de agua pueden difundirse hasta igualar la concentración. "a" es la presión osmótica de la solución.*

Osmosis inversa

Si una presión superior a la presión osmótica se aplica a la solución azucarada, las moléculas de agua se difundirán desde la solución azucarada hacia el compartimento del agua, aumentando de esta manera la concentración de dicha solución azucarada. Este proceso, ilustrado en la Figura 2.13, es utilizado comercialmente para la concentración de soluciones y se le llama *Osmosis Inversa* (OI).

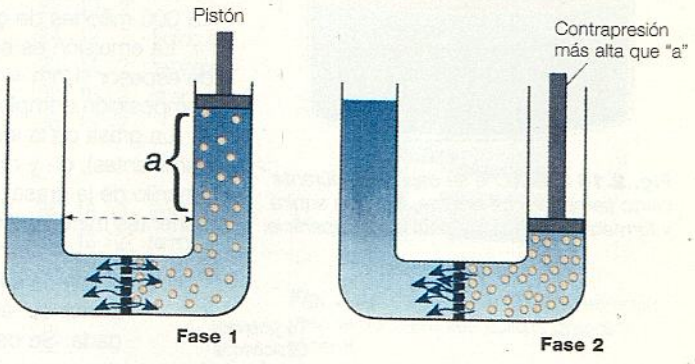


Fig. 2.13 *Si la presión es más alta que la presión osmótica que se aplica a la solución de azúcar, las moléculas de agua se difunden y la solución se concentra más.*

Diálisis

La diálisis es una técnica que emplea la diferencia de concentraciones como la fuerza impulsora para separar partículas grandes de otras pequeñas en una solución, por ejemplo, proteinas de sales. La solución a tratar se coloca en un lado de la membrana y al otro lado se coloca un disolvente (agua). La membrana tiene poros de un diámetro tal que permite el paso de las pequeñas moléculas de sal, pero que son demasiado pequeños para permitir el paso de las moléculas de proteina, tal como se indica en la Figura 2.14.

La velocidad de difusión varía con la diferencia de concentraciones, de tal forma que la diálisis puede ser acelerada si el disolvente del otro lado de la membrana se cambia de forma frecuente.

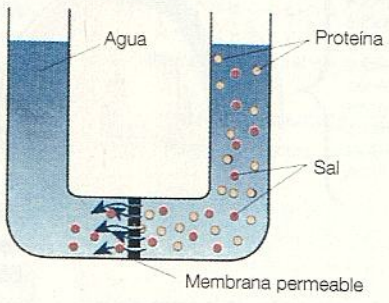


Fig. 2.14 *Al diluir la solución en una cara de la membrana se concentran las moléculas mayores conforme pasan las moléculas pequeñas a través de ella.*

Composición de la leche de vaca

Las cantidades de los distintos componentes principales de la leche pueden variar considerablemente entre vacas de diferentes razas e incluso entre individuos de la misma raza. Por lo tanto, solamente se pueden especificar valores límites para esas variaciones. Las cifras de la Tabla 2.3 son simplemente ejemplos.

Además de los sólidos totales, el extracto seco total (EST), el término sólidos no grasos (SNG) o extracto seco magro (ESM) se utilizan a la hora de hablar de la composición de la leche. SNG es el contenido total de sólidos exceptuando el de grasa. El contenido medio de SNG según la Tabla 2.3 sería de 13.0-3.0 = 9.1%. El pH de la leche normal generalmente oscila entre 6.5 y 6.7, siendo el valor más común el de 6.6. Estos valores se corresponden con una temperatura de medida de 25°C, aproximadamente.

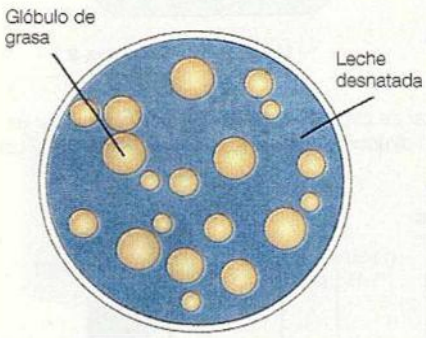


Fig. 2.15 *Un vistazo sobre la leche.*

Tabla 2.3
Composición cuantitativa de la leche.

Constituyente principal	Límites de variación	Valor medio
Agua	85.5 - 89.5	87.5
Sólidos totales	10.5 - 14.5	13.0
Grasa	2.5 - 6.0	3.9
Proteínas	2.9 - 5.0	3.4
Lactosa	3.6 - 5.5	4.8
Minerales	0.6 - 0.9	0.8

La grasa de la leche

La leche y la nata son ejemplos de emulsiones de grasa en agua (o aceite en agua). La grasa de la leche se presenta como pequeños glóbulos o gotitas dispersas en el suero de la leche (ver la Figura 2.15). Su diámetro oscila entre 0.1 y 20 μm (1 μm = 0.001 mm). El tamaño medio es de 3-4 μm, y se tienen unos 15 000 millones de glóbulos por mililitro.

La emulsión es estabilizada por una membrana muy delgada de sólo 5-10 nm de espesor (1 nm = 10^{-9} m) que rodea a los glóbulos. Esta membrana tiene una composición compleja.

La grasa de la leche está compuesta por triglicéridos (son los componentes dominantes), di- y monoglicéridos, ácidos grasos, esteroles, carotenoides (el color amarillo de la grasa), vitaminas (A, D, E y K), y otros elementos en trazas, y componentes minoritarios. En la Figura 2.17 se muestra un glóbulo de grasa seccionado.

Fig. 2.16 *Si la leche se deja estar durante cierto tiempo en un envase, la grasa subirá y formará una capa de nata en la superficie.*

La membrana está compuesta de fosfolípidos, lipoproteinas, cerebrósidos, proteinas, ácidos nucléicos, enzimas, elementos traza (metales) y agua ligada. Se debe resaltar que la composición y espesor de la membrana no son constantes debido a que sus constituyentes están continuamente intercambiándose con el suero de la leche que le rodea.

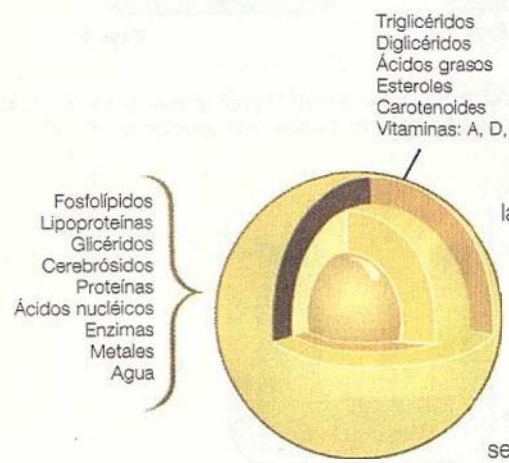


Fig. 2.17 *Composición de la grasa de la leche. Tamaño 0.1 - 20 μm. Tamaño medio 3-4 μm.*

Los glóbulos de grasa no solamente son las partículas más grandes de la leche sino que también son las partículas más ligeras (con una densidad de 0.93 g/cm³ a 15.5°C), por lo que tienden a subir hacia la superficie cuando la leche se deja reposar en un envase. Ver la Figura 2.16.

La velocidad de ascenso sigue la ley de Stokes, pero el pequeño tamaño de los glóbulos de grasa hacen que el descremado sea un proceso lento. Sin embargo, se puede acelerar la separación de la crema provocando la agregación de los glóbulos grasos bajo la influencia de una proteina denominada aglutinina. Estos agregados que se forman ascienden mucho más rapidamente que los glóbulos grasos individuales. Los agregados son facilmente rotos mediante calentamiento o tratamiento mecánico. La aglutinina se desnaturaliza mediante adecuadas combinaciones tiempo-temperatura, como 65°C/10 min o 75°C/2 min.

Estructura química de la grasa de la leche

La grasa de la leche es líquida cuando la leche sale de la ubre a 37°C. Esto significa que los glóbulos grasos pueden fácilmente cambiar su forma cuando se expo-

nen a tratamientos mecánicos moderados (bombeo y flujo por tuberías, por ejemplo) sin romperse sus membranas.

Todas las grasas pertenecen al grupo de sustancias químicas llamadas ésteres, que se forman a partir de alcoholes y ácidos. La grasa de la leche es una mezcla de diferentes ésteres de ácidos grasos llamados triglicéridos, que están compuestos por un alcohol llamado glicerol y distintos ácidos grasos. Los ácidos grasos representan alrededor del 90% de la grasa de la leche.

Una molécula de ácido graso está compuesta por una cadena hidrocarbonada y un grupo carboxílico (de fórmula RCOOH). En los ácidos grasos saturados los átomos de carbono están unidos en la cadena por enlaces simples, mientras que en los ácidos grasos insaturados hay uno o más enlaces dobles en la cadena. Cada molécula de glicerol se puede unir a tres moléculas de ácidos grasos y como éstcs no tienen necesariamente por qué ser del mismo tipo, el número de glicéridos diferentes presentes en la leche es muy amplio.

La Tabla 2.4 muestra la lista de los ácidos grasos más importantes presentes en los triglicéridos de la grasa de la leche.

La grasa de la leche se caracteriza por la presencia de cantidades relativamente importantes de ácido butírico y ácido caproico.

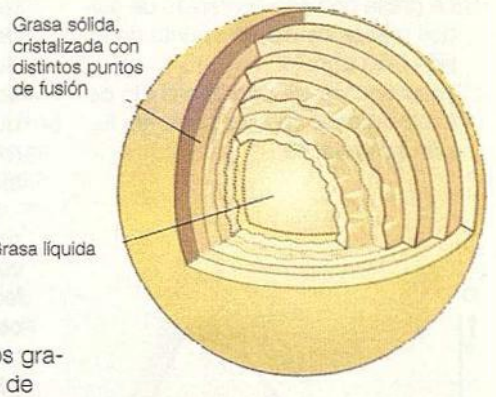


Fig. 2.18 Vista seccionada de un glóbulo de grasa.

Fig. 2.19 La grasa de la leche es una mezcla de diferentes ácidos grasos y glicerol.

Tabla 2.4
Principales ácidos grasos en la grasa de la leche

Ácido graso	% sobre el contenido total de ácidos grasos	Punto de fusión °C	Número de átomos H	C	O	
Saturados						
Ácido butírico	3.0 - 4.5	- 7.9	8	4	2	Líquido a
Ácido caproico	1.3 - 2.2	- 1.5	12	6	2	temperatu-
Ácido caprílico	0.8 - 2.5	+16.5	16	8	2	ra ambiente
Ácido cáprico	1.8 - 3.8	+31.4	20	10	2	
Ácido láurico	2.0 - 5.0	+43.6	24	12	2	Sólido a
Ácido mirístico	7.0 - 11.0	+53.8	28	14	2	temperatu-
Ácido palmítico	25.0 - 29.0	+62.6	32	16	2	ra ambiente
Ácido esteárico	7.0 - 3.0	+69.3	36	18	2	
Insaturados						
Ácido oléico	30.0 - 40.0	+14.0	34	18	2	Líquido a
Ácido linoléico	2.0 - 3.0	- 5.0	32	18	2	temperatu-
Ácido linolénico	hasta 1.0	- 5.0	30	18	2	ra ambiente
Ácido araquidónico	hasta 1.0	-49.5	32	20	2	

Punto de fusión de la grasa

La Tabla 2.4 muestra que los cuatro ácidos grasos más abundantes de la leche son los ácidos mirístico, palmítico, esteárico y oléico.

A temperatura ambiente, los tres primeros son sólidos y el último es líquido. Como indican las cifras citadas, las cantidades relativas de los diferentes ácidos grasos pueden variar considerablemente. Esta variación afecta a la dureza de la grasa. Una grasa con un contenido elevado de ácidos grasos de alto punto de fusión, tales como el ácido palmítico, será dura, mientras que una grasa con gran contenido de ácido oléico que tiene un bajo punto de fusión da lugar a una mantequilla blanda.

La determinación de la cantidad de cada uno de los ácidos grasos es de un interés puramente científico. Desde el punto de vista práctico, es suficiente determinar uno o más índices o parámetros que suministran cierta información con respecto a la composición de la grasa.

Indice de iodo

Los ácidos grasos con el mismo número de átomos de C y H, pero con diferente número de simples y dobles enlaces tienen características completamente diferen-

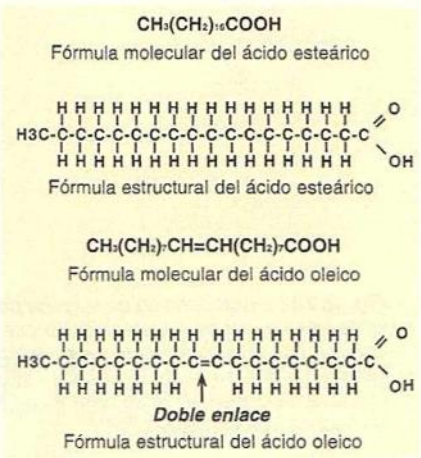


Fig. 2.20 Fórmulas molecular y estructural de los ácidos esteárico y oleico.

La grasa con alto contenido de ácidos grasos de elevado punto de fusión será dura.
La grasa con elevado contenido de ácidos grasos de bajo punto de fusión será blanda.

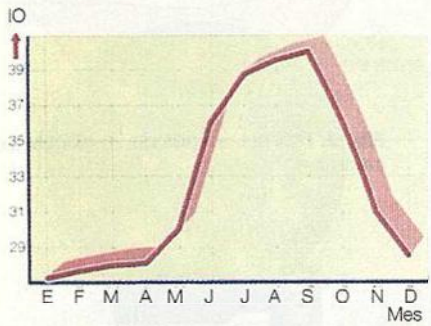


Fig. 2.21 *Índice de Iodo en diferentes épocas del año. El índice de iodo es una medida directa del contenido de ácido oléico de la grasa.*

tes. El índice más importante y más ampliamente usado es el llamado *índice de iodo* (IO) de la grasa, que indica el porcentaje de iodo que la grasa puede fijar. El iodo es fijado por los dobles enlaces de los ácidos grasos insaturados. Dado que el ácido oleico es el más abundante con mucho, de los ácidos grasos insaturados, que son líquidos a temperatura ambiente, el indice de iodo es en gran parte una medida del contenido en ácido oléico y, por lo tanto, de la textura más o menos blanda de la grasa.

El índice de iodo de la grasa láctea varía normalmente entre 24 y 46. Las variaciones están determinadas por la alimentación de las vacas. Los pastos verdes del verano promueven un alto contenido en ácido oléico, de forma que la grasa de la leche de esa estación es blanda (con alto índice de iodo). Algunos piensos concentrados, como las tortas de girasol y linaza, también producen grasa blanda, mientras que otros tipos de pienso como las tortas de aceite de coco y de palma, y los tubérculos, producen grasa dura. Por lo tanto, es posible influir sobre la consistencia de la grasa de la leche escogiendo la alimentación adecuada para las vacas. Para una mantequilla de óptima consistencia, el valor del índice de iodo debería estar comprendido entre 32 y 37.

La Figura 2.21 muestra un ejemplo de cómo el índice de iodo de la grasa de la leche puede variar en el transcurso de un año (en Suecia).

Indice de refracción

La cantidad relativa de los diferentes ácidos grasos presentes en la grasa afecta también a la forma en que ésta refleja la luz. Es por ello práctica común determinar el índice de refracción de la grasa, que puede ser utilizado para calcular el índice de iodo. Este es un método rápido de evaluación aproximada de la dureza de la grasa. El índice de refracción normalmente varía entre 40 y 46.

Resonancia Magnética Nuclear (RMN)

En lugar de analizar el indice de iodo o indice de refracción, se puede analizar la relación grasa saturada/grasa insaturada mediante técnicas RMN. Si se desea, se puede utilizar un factor de conversión para transformar el valor de RMN obtenido en el valor correspondiente de índice de iodo.

El método RMN se puede utilizar también para obtener el grado de cristalización de la grasa en función del tiempo de cristalización. En unas experiencias llevadas a cabo en el laboratorio SMR en Malmö (Suecia), entre 1979 y 1981, se mostró que la cristalización de la grasa consume gran cantidad de tiempo en el enfriamiento de crema al 40%, desde 60°C hasta 5°C. Se necesitaba al menos un tiempo de cristalización de 2 horas, y la proporción de grasa cristalizada era del 65% del total.

Se comprobó que estaba cristalizada sólo el 15-20% de la grasa 2 minutos después de que se alcanzara la temperatura de 5°C. El valor de RMN de la mantequilla normalmente varía entre 30 y 41.

Cristalización de la grasa

Durante el proceso de cristalización los glóbulos de grasa están en estado muy sensible y se rompen facilmente (se abren) incluso aplicando moderados tratamientos mecánicos.

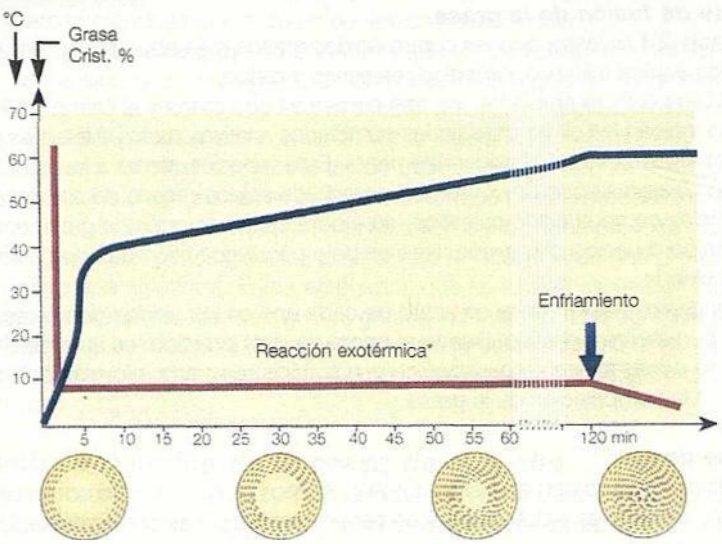


Fig. 2.22 *La cristalización de la grasa de la leche es una reacción exotérmica, lo que significa que la reacción química irá acompañada de una evolución de la temperatura. La curva de cristalización se basa en análisis hechos con el método RMN.*

** Exotérmica= reacción química acompañada de desarrollo de calor (Calor de fusión).*

Estudios realizados en microscopía electrónica han mostrado que la grasa cristaliza según esferas monomoleculares (ver la Figura 2.22). Al mismo tiempo tiene lugar el fraccionamiento, ya que los triglicéridos con altos puntos de fusión forman el recubrimiento de las esferas. Como la grasa cristalizada tiene un volumen específico más bajo que la grasa líquida, tiene lugar una formación de tensiones dentro del glóbulo de grasa, haciéndolo particularmente inestable y susceptible a la rotura durante el período de cristalización. Lo que ocurre es que se desprende la grasa líquida hacia el suero de la leche, dando lugar a la formación de grumos que se originan al actuar esta grasa libre como cola que se adhiere a los glóbulos enteros de grasa que encuentra (es el mismo fenómeno que tiene lugar en la fabricación de mantequilla). La cristalización de grasa genera calor de fusión (o congelación), que hace subir ligeramente la temperatura (una nata del 40% que se enfría desde 60°C hasta 7-8°C se calienta 3-4°C durante el período de cristalización).

Es importante tener en cuenta esta interesante propiedad de la grasa de la leche en la fabricación de nata.

Las proteinas de la leche

Las proteinas son una parte esencial de nuestra dieta. Las proteinas que nosotros comemos son descompuestas en productos más simples por el sistema digestivo y por el hígado. Esos productos son entonces transportados hasta las células del cuerpo donde se utilizan como material de construcción de las proteinas de nuestro propio cuerpo. La gran mayoría de las reacciones químicas que tienen lugar en el organismo están controladas por ciertas proteinas activas, conocidas como enzimas.

Las proteinas son moléculas gigantes formadas por unidades más pequeñas, llamadas aminoácidos (ver la Figura 2.23). Una molécula de proteina consta de una o más cadenas entrelazadas de aminoácidos, donde éstos están dispuestos según un orden específico. Una molécula de proteina contiene normalmente alrededor de 100-200 aminoácidos unidos, pero también existen otras proteinas con números mayores y menores de aminoácidos.

Aminoácidos

Los aminoácidos son los ladrillos con los que están construidas las proteinas, tal como se ve en la Figura 2.24, y se distinguen por la presencia simultánea en su molécula de un grupo amino (NH_2) y un grupo carboxílico (COOH). Las proteinas están formadas por un tipo específico de aminoácidos, los α-aminoácidos, que son aquellos que tienen un grupo amino y un grupo carboxílico en el mismo átomo de carbono, que se denomina carbono-α.

Los aminoácidos pertenecen a un grupo de compuestos químicos que pueden emitir iones hidronio en soluciones alcalinas y absorber iones hidronio en soluciones ácidas. Tales compuestos se denominan electrolitos anfóteros o anfolitos. Los aminoácidos pueden entonces aparecer según tres estados:

1. Cargados negativamente en soluciones alcalinas
2. En forma neutra con iguales cargas + y -
3. Cargados positivamente en soluciones ácidas

Las proteinas se construyen a partir de unos 20 tipos de aminoácidos, 18 de los cuales se encuentran en la leche.

Desde el punto de vista de la nutrición, un factor importante a tener en cuenta es que ocho (nueve en los niños) de estos 20 aminoácidos no pueden ser sintetizados por el organismo humano. Como estos aminoácidos son esenciales para mantener un adecuado metabolismo, el organismo tiene que conseguirlos a través de los alimentos que se ingieren. Por lo anterior se denominan aminoácidos esenciales, que curiosamente se encuentran todos en las proteinas de la leche.

El tipo y el orden en el que se encuentran los aminoácidos en la molécula de proteina determinan la naturaleza de dicha proteina. Cualquier cambio en los aminoácidos referente al tipo o al lugar que ocupan en la cadena molecular tendrá como resultado una proteina con propiedades distintas. Como el número posible de combinaciones de los 18 aminoácidos en una cadena que contenga de 100 a 200 aminoácidos es casi ilimitado, el número de proteinas con diferentes propiedades será también ilimitado. La Figura 2.24 muestra un modelo de un aminoácido. La principal característica de los aminoácidos es que contienen un grupo amino ligeramente básico (-NH_2) y un grupo carboxílico ligeramente ácido (-COOH). Estos grupos están unidos a un extremo de la cadena, (R).

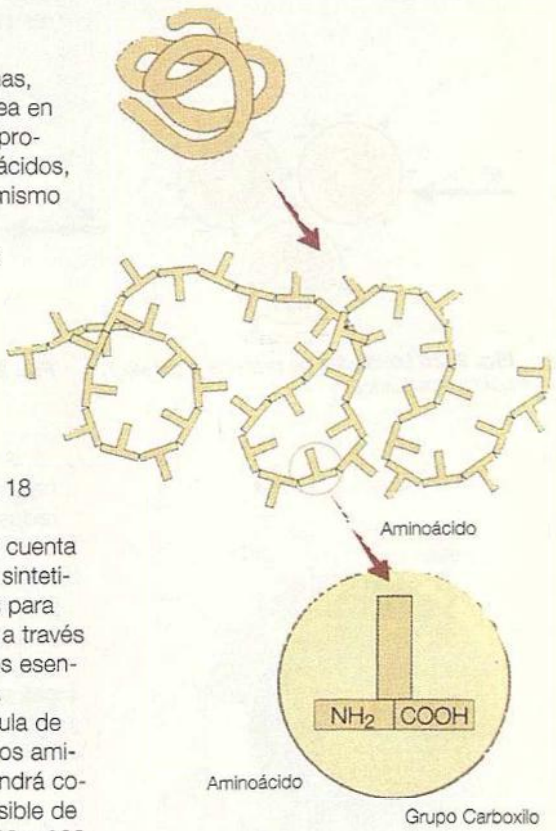


Fig. 2.23 *Modelo de una molécula de proteína como cadena de aminoácidos, grupos amino y carboxilo.*

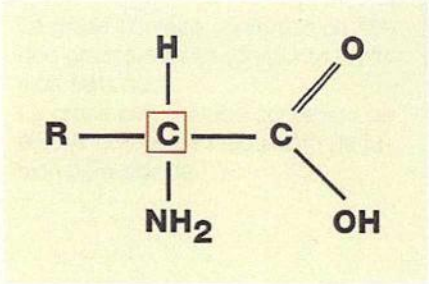


Fig. 2.24 *Estructura general de un aminoácido. En la figura R representa materia orgánica ligada al átomo de carbono central.*

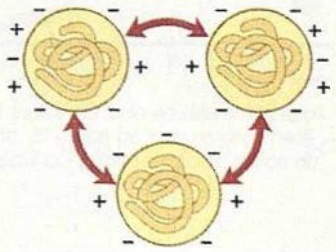


Fig. 2.25 *Una molécula de proteína a pH 6.6 tiene una carga negativa.*

Si el extremo de la cadena es polar, las propiedades de atracción del agua de los grupos ácido y básico, junto con la polaridad del lado de la cadena, normalmente dominarán y el aminoácido entero atraerá al agua y se disolverá rapidamente en ella. Tales aminoácidos se denominan hodrofílicos (que atraen al agua).

Si por el contrario, el extremo de la cadena es de hidrocarburo que no contiene radicales hidrofílicos, dominarán las propiedades de la cadena de hidrocarburo. Un hidrocarburo de cadena larga repele al agua y hace que los aminoácidos sean menos solubles o compatibles con el agua. Tales aminoácidos se denominan hidrófobos (que repelen al agua).

Si hay ciertos radicales en la cadena hidrocarbonada, tales como los grupos hidroxilo (-OH) o los grupos amino ($-NH_2$), las propiedades hidrófobas se verán modificadas, siendo más hidrófila la cadena hidrocarbonada antes citada. Si predominan aminoácidos hidrófobos en una parte de la molécula de proteina, esa parte tendrá propiedades hidrófobas. Por otra parte, una agregación de aminoácidos hidrófilos en otra parte de la molécula dará a esa porción propiedades hidrófilas. Una molécula de proteina puede, por lo tanto, ser hidrófila, hidrófoba, o bien hidrófila o hidrófoba localmente.

Algunas proteinas de la leche presentan grandes diferencias entre sus moléculas con respecto a la compatibilidad con el agua, y algunas propiedades muy importantes de las proteinas dependen de tales diferencias.

Los grupos hidroxilos de la cadena de algunos aminoácidos de la caseina pueden ser esterificados con ácido fosfórico. Esos grupos hacen que la caseina pueda ligar iones de calcio o hidrofosfato cálcico coloidal, formando fuertes enlaces entre y dentro de las moléculas.

Estatus eléctrico de las proteinas de la leche

Los aminoácidos de las proteinas de la leche llevan una carga eléctrica que viene determinada por el pH de la misma. Cuando el pH de la leche es modificado por la adición de un ácido o una base, la distribución de las cargas en las proteinas también cambia. El estatus eléctrico de las proteinas de la leche y las propiedades resultantes se ilustran en las Figuras 2.25 a 2.28.

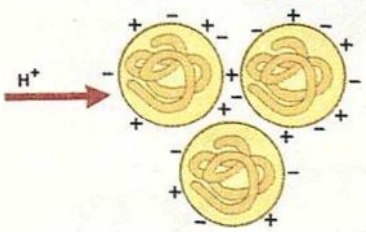


Fig. 2.26 *Moléculas de proteína a pH ≈4.7, punto isoeléctrico.*

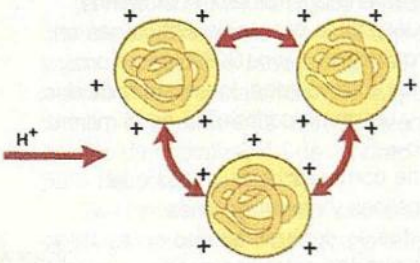


Fig. 2.27 *Moléculas de proteinas a pH ≈ 1.*

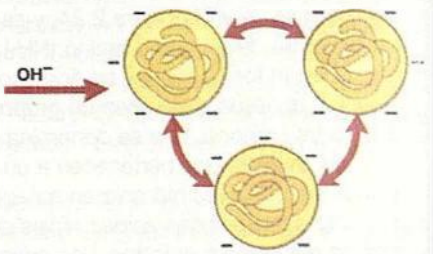


Fig. 2.28 *Moléculas de proteinas a pH ≈ 14.*

A pH normal de la leche (pH = 6.6), una molécula de proteina tiene una carga neta negativa (ver Figura 2.25). Las moléculas de las proteinas permanecen separadas debido a que poseen la misma carga y se repelen entre sí.

Si se añaden iones hidrógeno, (ver la Figura 2.26) éstos son absorbidos por las moléculas de proteina. En un pH donde la carga positiva de la proteina sea igual a la carga negativa, por ejemplo cuando el número de grupos NH_3^+ y COO^- se igualen, la carga neta total de la proteina será cero. Las moléculas de proteina ya no se repelen entre sí y, además, las cargas positivas de unas se atraen por las cargas positivas de las otras, lo que provoca el efecto contrario al anteriormente observado, y las moléculas se agrupan. De esta forma, las proteinas se precipitan y se separan de la solución. A este pH se le conoce como *punto isoeléctrico* de la proteina.

En presencia de un exceso de iones hidrógeno las moléculas adquieren una carga neta positiva tal como se muestra en la Figura 2.27. Entonces se repelen entre sí lo que favorece la estabilidad de la solución.

Si, por el contrario, se añade una solución fuertemente alcalina (NaOH), todas las proteinas toman carga negativa. Esto también hace que se mantengan en solución.

Clases de proteinas lácteas

La leche contiene cientos de tipos distintos de proteinas, muchas de las cuales se encuentran en muy pequeñas cantidades. Las proteinas pueden clasificarse de diversas formas según sus propiedades físicas o químicas, o sus funciones biológicas. El antiguo criterio de clasificación de las proteinas en caseina, albúmina y globulina ha sido cambiado en la actualidad por un sistema de clasificación más adecuado. La Tabla 2.5 muestra una lista abreviada de proteinas de la leche según un moderno sistema. Con objeto de simplificar se han excluido de esta tabla los grupos de proteinas que se encuentran presentes en muy pequeña proporción.

Seroproteina es un término utilizado con frecuencia como sinónimo de proteinas del suero de la leche, pero este término debería estar reservado para las proteinas existentes en el suero procedente de la fabricación de queso. Además de las proteinas del suero de la leche, las proteinas del suero de quesería contienen fragmentos de moléculas de caseina. Algunas de las proteinas del suero de la leche también están presentes en menor concentración que en la leche original. Ello es debido a la desnaturalización por calor que se produce durante la pasteurización de la leche antes de transformarse en queso. Los tres principales grupos de proteinas presentes en la leche se distinguen por su diferente comportamiento y por su forma de existencia. Las caseinas son fácilmente precipitadas en la leche por diversos procedimientos, mientras que las proteinas del suero normalmente permanecen en solución. Las proteinas de las membranas de los glóbulos de grasa se adhieren, como su nombre indica, a la superficie de dichos glóbulos grasos y solamente se pueden separar mediante acciones mecánicas, tales como el batido de la nata en la fabricación de mantequilla.

Tabla 2.5
Concentración de proteinas en la leche

	Conc. en la leche g/kg	% de proteina total (p/p)
Caseina		
α_{s1}-caseina*)	10.0	30.6
α_{s2}-caseina*)	2.6	8.0
β-caseina**)	10.1	30.8
κ-caseina	3.3	10.1
Total caseina	26.0	79.5
Seroproteinas		
α-lactoalbúmina	1.2	3.7
β-lactoglobulina	3.2	9.8
Albúmina del suero sanguíneo	0.4	1.2
Inmunoglobulinas	0.7	2.1
Otras (incluyendo peptona-proteasa)	0.8	2.4
Total Seroproteinas	6.3	19.3
Proteinas de la membrana del glóbulo de grasa	0.4	1.2
Proteina total	32.7	100

*) En adelante denominada α_{s}-caseina
**) Incluyendo γ-caseina
Ref: Walstra & Jennis

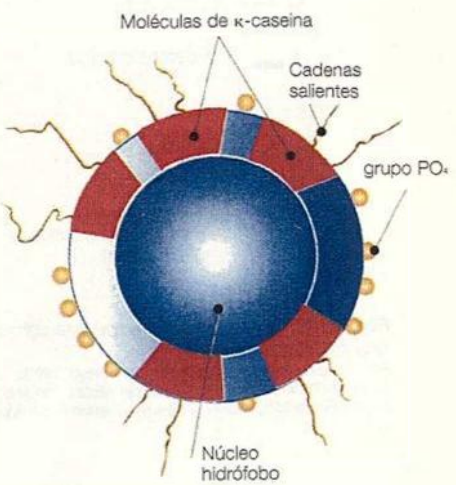


Fig. 2.29 *Estructura de una submicela de caseina.*

Caseina

La caseina da nombre a un grupo de proteinas que son las dominantes en la leche. Como todas las proteinas, las caseinas forman fácilmente polímeros que contienen diversos grupos de moléculas idénticos o diferentes. Debido a la abundancia de grupos ionizables y de polos hidrófobos e hidrófilos en la molécula de caseina, los polímeros formados por las caseinas son muy especiales. Los polímeros están constituídos por centenares o miles de moléculas individuales, y forman una

solución coloidal que puede ser observada en la leche desnatada por su apariencia azul blanquecina. Estos complejos moleculares se conocen como micelas de caseína. Estas micelas de caseína pueden medir hasta 0.4 micras, pudiéndo observarse solamente con un microscopio electrónico.

Micelas de caseína

Los tres subgrupos de caseínas, la α-caseína, la κ-caseína y la β-caseína son todos heterogeneos y constan de 2-8 variantes genéticas. Las variantes genéticas de una proteina difieren entre sí en sólo unos pocos aminoácidos. Los tres subgrupos tienen en común el hecho de que uno de cada dos aminoácidos que contienen grupos hidroxilo estás esterificados con el ácido fosfórico. El ácido fosfórico se une con el calcio y magnesio, así como con algunas sales complejas, para formar uniones entre moléculas y dentro de las propias moléculas.

Las micelas de caseína, tal como se muestra en la Figura 2.30, consisten en un complejo de submicelas (Figura 2.29) con un diámetro de 10 a 15 nm (1 nanómetro = 1 nm = 10^{-9} m). El contenido de α-, β- y κ-caseína está distribuido de forma heterogénea en las diferentes micelas.

Las sales de calcio de α-caseína y β-caseína son casi insolubles en agua, mientras que las de κ-caseína son claramente solubles. Debido a la localización dominante de la κ-caseína en la superficie de las micelas, la solubilidad del κ-caseinato cálcico prevalecerá sobre la insolubilidad de los otros dos tipos de sales en las micelas, y la micela completa será soluble como un coloide. (ver el libro Advanced dairy chemistry, Vol. 1. Proteins, de P.F. Fox).

De acuerdo con Rollema (1992), la combinación de modelos de Slattery & Evard (1973), Schmidt (1982) y Walstra (1990) proporciona la mejor ilustración de cómo las micelas de caseína se construyen y se estabilizan.

El fosfato cálcico y las interacciones hidrófobas entre las submicelas son las responsables de la integridad de las micelas de caseína. Las cadenas hidrocarbonadas hidrófilas de las partes exterioes de la κ-caseína que contienen un grupo carbohidrato se proyectan hacia el exterior de las micelas complejas, confiriéndoles una apariencia de cabellera, y consiguiendo la estabilidad de la miscela. Este fenómeno se debe básicamente a la fuerte carga negativa de los carbohidratos.

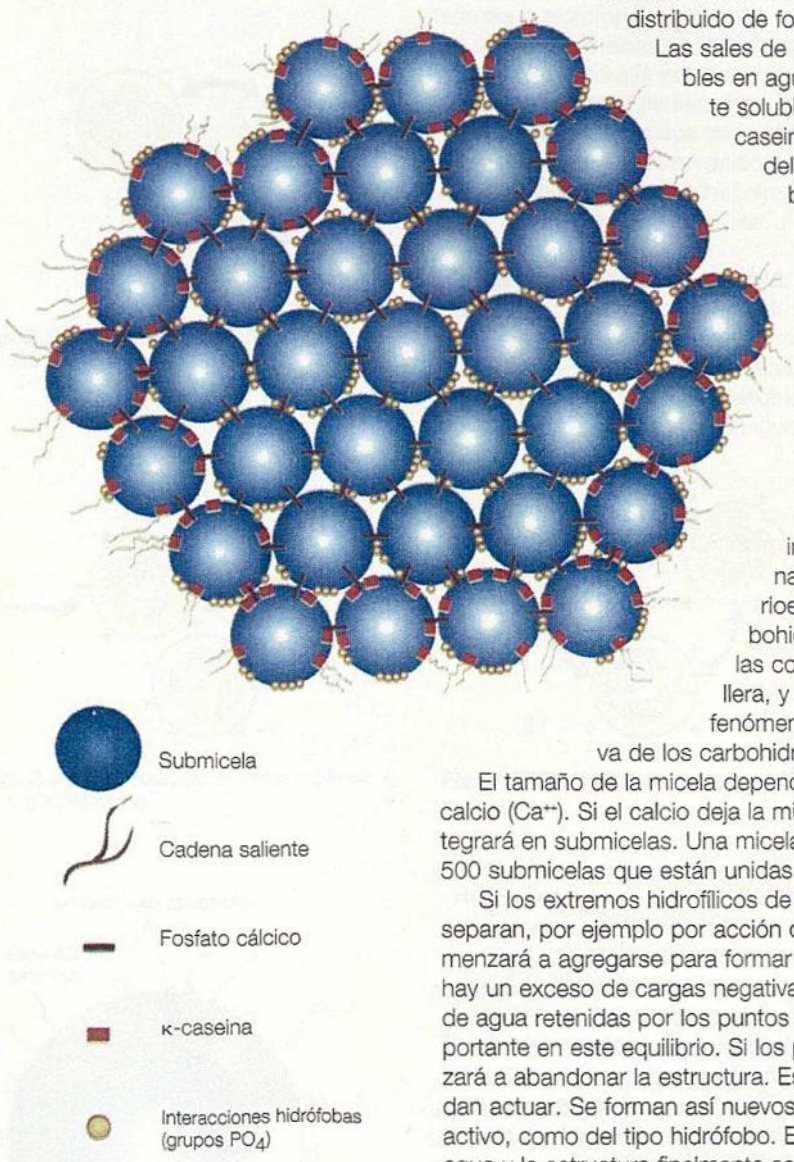


Fig. 2.30 *Construcción y estabilización de una micela de caseína.*
Ref: A digest of models by Slattery and Evard (1973), Schmidt (1982) Walstra (1992) Casein Association and Micelle Formation p 63-111. Elsevier Science Publications Ltd.

El tamaño de la micela depende en gran medida del contenido de iones de calcio (Ca^{++}). Si el calcio deja la micela, por ejemplo por diálisis, la micela se desintegrará en submicelas. Una micela de tamaño medio está formada por unas 400 a 500 submicelas que están unidas entre sí tal como se ha descrito anteriormente.

Si los extremos hidrofílicos de la κ-caseína de la superficie de las micelas se separan, por ejemplo por acción del cuajo, la micela perderá su solubilidad y comenzará a agregarse para formar una cuajada de caseína. En una micela intacta hay un exceso de cargas negativas, por lo que se repelen entre sí. Las moléculas de agua retenidas por los puntos hidrófilos de la κ-caseína participan de forma importante en este equilibrio. Si los puntos hidrófilos son eliminados, el agua comenzará a abandonar la estructura. Esto da lugar a que las fuerzas de atracción puedan actuar. Se forman así nuevos enlaces tanto del tipo salino, donde el calcio es activo, como del tipo hidrófobo. Estos enlaces facilitarán entonces la expulsión del agua y la estructura finalmente se convertirá en una densa cuajada.

Las micelas se ven afectadas negativamente por las bajas temperaturas. A temperaturas cercanas al punto de congelación, las cadenas de β-caseína comienzan a disociarse y el hidroxifosfato cálcico abandona la estructura de la micela, donde se encontraba en forma coloidal, disolviéndose a continuación. La explicación de este fenómeno es que la β-caseína es la más hidrófoba de las caseinas, y este carácter se pronuncia sobremanera cuando se disminuye la temperatura. Estos cambios hacen que la leche sea menos adecuada para la fabricación de

queso, debido a que dan lugar a un periodo de cuajado más largo y a la obtención de una cuajada más blanda.

También, la β-caseina es entonces más facilmente hidrolizada por diferentes proteasas en la leche tras abandonar la micela. La hidrólisis de β-caseina a κ-caseina y proteosa-peptona da lugar a menores rendimientos en la fabricación de queso debido a que la proteosa-peptona se pierde en el suero. La rotura de la β-caseina puede también dar lugar a la formación de péptidos amargos, que provocan problemas de malos sabores en el queso.

La curva que se muestra en la Figura 2.31 indica la cantidad aproximada de β-caseina (en %) que deja la micela a +5°C durante 20 horas de tiempo de almacenamiento.

En este contexto es interesante indicar que cuando la leche cruda, o la leche almacenada después de pasteurizada y enfriada, se calienta a 62-65°C durante 20 segundos, la β-caseina y el hidrofosfato cálcico volverán a la micela, restaurándose al menos parcialmente las propiedades originales de la leche.

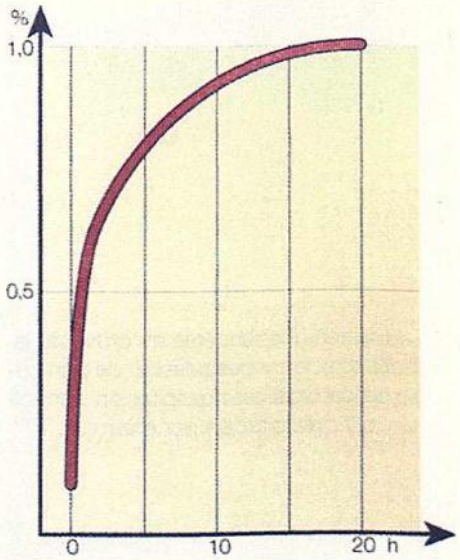


Fig. 2.31 *β-caseina en el suero de la leche a +5°C.*
Ref: Dr. B Lindquist (1980), Arla Stockholm, Sweden.

Precipitación de la caseina

Una propiedad característica de la caseina es su capacidad para precipitar. Debido a la naturaleza compleja de las moléculas de caseina, y de las micelas formadas con ellas, la precipitación puede ser originada por diferentes agentes. Debe observarse que hay una gran diferencia en las condiciones óptimas de precipitación de la caseina en forma micelar y la que se encuentra en forma no micelar, como por ejemplo el caseinato sódico. Las explicaciones que siguen se refieren principalmente a la precipitación de la caseina micelar.

Precipitación por ácido

El pH bajará si se añade un ácido a la leche o si se deja que se multipliquen en la misma bacterias acidificantes. Esto cambiará el entorno de las micelas de caseina de dos maneras (tal como se indica en la Figura 2.32). En primer lugar, el hidroxifosfato cálcico coloidal, que está presente en la micela de caseina, se disolverá y formará calcio ionizado que penetrará en la estructura de la micela creando unas fuertes uniones internas cálcicas. En segundo lugar, el pH de la solución se acercará a los puntos isoeléctricos de las especies individuales de caseina.

Nota: Si se añade un exceso de ácido a un coágulo dado, la caseina se redisolverá, formando una sal con el ácido clorhídrico, la solución contendrá cloruro de caseina parcialmente disociada en iones.

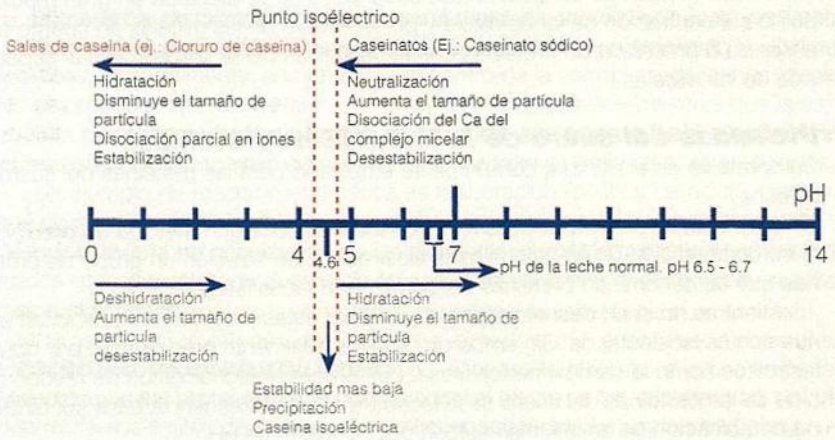


Fig. 2.32 *Tres etapas simplificadas de influencia de un ácido y un álcali sobre la caseina, respectivamente.*

Ambos métodos de acción iniciarán un cambio en el interior de las micelas, que comienza con el aumento de tamaño de las mismas por agregación y que termina con la formación de un coágulo más o menos denso. Dependiendo del valor final del pH, este coágulo contiene caseina en forma de sales de caseina o caseina en su estado isoeléctrico, o ambas a la vez.

Los puntos isoeléctricos de los componentes de la caseina dependen de los iones de otras clases presentes en la solución. Valores teóricos de pH, que tienen validez bajo ciertas condiciones, son de 5.1 a 5.3. En soluciones salinas, de características similares a la leche, el rango de pH de precipitación óptima es de 4.5 a 4.9. Un valor práctico para la precipitación de la caseina de la leche es un pH de 4.7.

Si se añade un exceso de hidróxido sódico a la caseina isoeléctrica precipitada, la caseina redisuelta se convertirá en caseinato sódico, parcialmente disociado

en iones. El pH de los productos lácteos fermentados está normalmente en el rango de 3.9-4.5, que está en el lado ácido de los puntos isoeléctricos. En el proceso de obtención de caseina a partir de leche desnatada por adición de ácido sulfúrico o clorhídrico, el pH elegido es normalmente de 4.6.

Existen dos maneras de provocar la floculación y coagulación de partículas de caseina: precipitación por ácido y precipitación por enzimas.

Precipitación por enzimas

La cadena aminoácida que forma la molécula de κ-caseina consta de 169 aminoácidos. Desde un punto de vista enzimático, la unión entre los aminoácidos 105 (fenilalanina) y 106 (metionina) es fácilmente accesible a muchas enzimas proteolíticas.

Algunas enzimas proteolíticas son capaces de atacar este enlace y romper la cadena. La parte soluble de esta cadena contiene los aminoácidos 106 a 148, donde predominan los aminoácidos polares y el carbohidrato, que dan a la molécula sus propiedades hidrófilas. Esa parte de la molécula de κ-caseina es conocida como glico-macropéptido y se elimina con el suero durante el proceso de fabricación del queso.

La parte que resta de la κ-caseina, que consta de los aminoácidos 1 al 105, es bastante insoluble y permanece en la cuajada junto con las caseinas α_s y β. A esta porción se le llama para-κ-caseina. Antiguamente, se decía que todo el coágulo estaba formado de para-caseina.

La formación del coágulo se debe a la eliminación repentina del macropéptido hidrófilo y al desequilibrio que esto causa en las fuerzas intermoleculares. Los enlaces entre puntos hidrófobos comienzan a formarse, y se refuerzan por enlaces de calcio que se van desarrollando conforme las moléculas de agua de las micelas empiezan a abandonar la estructura. A este proceso se le conoce normalmente como la fase de coagulación y sinéresis.

La rotura del enlace 105-106 en la molécula de κ-caseina es conocida como la primera fase de la acción del cuajo, mientras que la fase de coagulación y sinéresis es conocida como la fase secundaria.

Hay también una tercera fase en la acción del cuajo, cuando éste ataca a los componentes de la caseina de forma generalizada. Esto ocurre durante la maduración del queso.

La duración de las tres fases está determinada principalmente por el pH y la temperatura. Además de ésto, la fase secundaria se ve afectada en gran medida por la concentración de iones calcio y por el estado de las micelas en cuanto a la ausencia o presencia de proteinas desnaturalizadas del lactosuero en las superficies de las micelas.

Proteinas del suero de la leche (Seroproteinas)

Seroproteina es el nombre comúnmente empleado para las proteinas del suero de la leche.

Si la caseina se elimina de la leche desnatada por algún método de precipitación, como la adición de ácidos minerales, queda en solución un grupo de proteinas que se denominan proteinas del suero de la leche (seroproteinas).

Las seroproteinas son:

α-*lactoalbúmina*
β-*lactoglobulina*

Mientras no sean desnaturalizadas por calor estas proteinas no precipitan en sus puntos isoeléctricos. Sin embargo, son habitualmente precipitadas por polielectrolitos como la carboximetilcelulosa. Los procesos tecnológicos de recuperación de las proteinas del suero de la leche utilizan con frecuencia tales sustancias, o una combinación de las mismas con calor y ajuste de pH.

Cuando se calienta la leche, parte de las proteinas del suero de la misma se desnaturalizan y forman complejos con la caseina, disminuyendo la capacidad de la caseina para ser atacada por el cuajo y ligar calcio. La cuajada de leche calentada a una alta temperatura no suelta suero como lo suele hacer en condiciones normales la cuajada en la fabricación de queso, debido al menor número de enlaces de caseina dentro y entre moléculas de caseina.

Las proteinas del suero de leche en general y la α-lactoalbúmina en particular son de un alto valor nutritivo. Su composición en aminoácidos es muy cercana a la que es considerada como biológicamente óptima. Los preparados de proteina de suero son muy utilizados en la industria alimentaria.

α-lactoalbúmina

Esta proteina es considerada como la típica proteina del suero de leche. Está presente en la leche de todos los mamíferos y juega un papel importante en la síntesis de la lactosa en la ubre.

β-lactoglobulina

Esta proteina es exclusiva de los animales de pezuña hendida (ungulados) y es la proteina más abundante en el suero de leche procedente de vacas. Si la leche se calienta por encima de 60ºC comienza la desnaturalización donde la reactividad del aminoácido sulfurado de la β-lactoglobulina juega un papel predominante. Se empiezan a formar enlaces sulfuro entre las moléculas de β-lactoglobulina, entre una molécula de β-lactoglobulina y una molécula de κ-caseina, y entre la β-lactoglobulina y la α-lactoalbúmina. A altas temperaturas, los compuestos que contienen azufre tales como el sulfuro de hidrógeno son liberados gradualmente. Esos compuestos que contienen azufre son responsables del sabor a "cocido" de la leche sobretratada térmicamente.

Inmunoglobulinas y proteinas relacionadas

Este grupo de proteinas es muy heterogéneo, y pocos de sus componentes han sido estudiados de forma precisa. En el futuro muchas sustancias de importancia serán probablemente aisladas a escala comercial a partir del suero de la leche o del suero de quesería. La lactoferrina y la lactoperoxidasa son sustancias de posible utilización en las industrias farmaceutica y alimentaria, y se aislan actualmente a partir del lactosuero mediante un proceso comercial. El Dr. H. Burling y colaboradores, del Departamento de I+D de la Swedish Daries Association (SDA), en Malmö (Suecia), han desarrollado un método de aislamiento de estas sustancias.

Proteinas de la membrana del glóbulo graso

Estas proteinas constituyen un grupo que se caracteriza por formar una capa protectora alrededor de los glóbulos de grasa que consigue estabilizar la emulsión. La consistencia de estas proteinas de membrana puede ser desde suave y gelatinosa en algunas hasta bastante firme y fuerte en otras. Algunas de las proteinas citadas contienen residuos de lípidos y se les llama lipoproteinas. Los lípidos y los aminoácidos hidrófobos de estas proteinas hacen que las moléculas dirijan sus puntos hidrófobos hacia la superficie de la grasa, mientras que las partes menos hidrófobas se orientan hacia el agua.

Otras proteinas de este grupo, débilmente hidrófobas, se unen a estas capas de proteina de la misma forma, dando lugar a un gradiente de hidrofobia desde la superficie de la grasa hacia el agua.

El gradiente de hidrofobia en tales membranas las convierte en lugar ideal para la absorción de moléculas en cualquier grado de hidrofobia. Fosfolípidos y enzimas lipolíticas, especialmente, son absorbidas dentro de la estructura de la membrana. No se producen reacciones entre las enzimas y sus sustratos mientras que la estructura permanece intacta, pero tan pronto como la estructura es destruida las enzimas tienen la oportunidad de encontrar su sustrato y comienzan las reacciones.

Un ejemplo de reacción enzimática es la liberación lipolítica de ácidos grasos que se produce cuando la leche se bombea en frío con una bomba defectuosa, o después de la homogeneización de leche fría sin una pasterización inmediata. Los ácidos grasos y otros productos de esta reacción enzimática comunican un sabor rancio al producto.

Proteinas desnaturalizadas

Mientras que las proteinas se encuentran en un medio con la temperatura y el pH dentro de sus límites de tolerancia, mantienen todas sus funciones biológicas. Pero si se calientan a temperaturas por encima de un cierto nivel máximo, su estructura se ve alterada. Se dice que son desnaturalizadas, como se ve en la Figura 2.33. Lo mismo sucede cuando las proteinas son expuestas a la acción de ácidos o bases, a la radiación o a una agitación violenta. Las proteinas se desnaturalizan y pierden su solubilidad inicial.

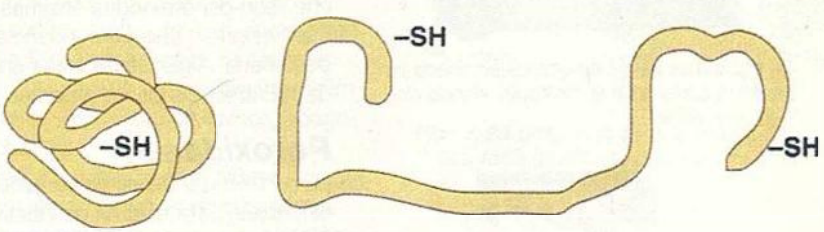


Fig. 2.33 *Parte de una seroproteina en estado original (izquierda) y estado desnaturalizado.*

Cuando las proteinas son desnaturalizadas cesa su actividad biológica. Las enzimas, que constituyen una clase de proteinas cuya función es catalizar reacciones, pierden esta propiedad cuando son desnaturalizadas. La razón es que ciertos enlaces en la molécula se rompen, cambiando la estructura de la proteina. Se ha demostrado que las proteinas desnaturalizadas ligeramente pueden a veces volver a su estado original, recuperando sus funciones biológicas.

Fig. 2.34 *Si se añade un álcali a un ácido, el pH de la solución aumenta inmediatamente, no se tiene efecto tampón.*

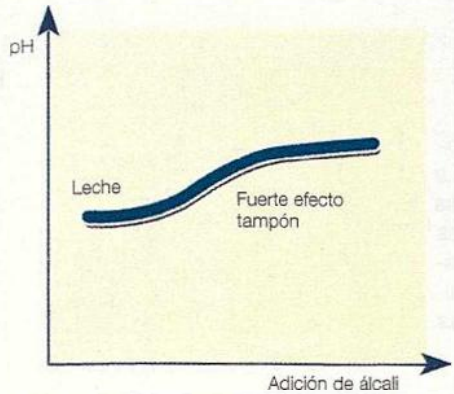


Fig. 2.35 *Si se añade un álcali a la leche el pH cambia muy lentamente. La leche tiene un considerable efecto tampón.*

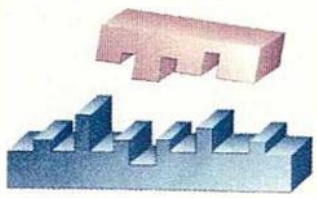
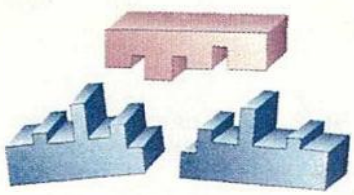


Fig. 2.36 *Un enzima determinado sólo hidrolizará ciertas moléculas, y sólo ciertos enlaces.*

La enzima se ajusta en una determinada zona en la cadena de la molécula, donde debilita el enlace.



La molécula se divide. Ahora, la enzima está libre para atacar e hidrolizar otra molécula de la misma manera.

Sin embargo, en muchos casos la desnaturalización es irreversible. Por ejemplo, las proteinas de un huevo hervido no pueden ser restauradas a su estado original.

La leche es una solución tampón

La leche contiene una gran cantidad de sustancias que pueden actuar bien como ácidos débiles o como bases débiles, como, por ejemplo, el ácido cítrico y el ácido fosfórico y sus respectivas sales: lactatos, citratos y fosfatos. En química, un sistema de este tipo es conocido como solución tampón porque, dentro de ciertos límites, hace que el valor del pH permanezca constante cuando se añaden ácidos o bases. Este efecto puede ser explicado por las propiedades características de las proteinas.

Cuando la leche se acidifica, se añade un gran número de iones hidrógeno (H^+). Casi todos estos iones están unidos a grupos amino de las cadenas de los aminoácidos, formando los iones NH_3^+. Sin embargo, el valor del pH apenas si se ve afectado, ya que el incremento en la concentración de iones hidrógeno libres será muy pequeño.

Cuando se añade una base a la leche se liberan los iones hidrógeno (H^+) de los grupos COOH de los aminoácidos, formando grupos COO^-. Debido a esto, el valor del pH permanecerá más o menos constante. Cuanto mayor es la cantidad de base añadida, mayor es el número de iones de hidrógeno liberados.

Otros componentes de la leche tienen también esta propiedad de tomar o ceder iones y, por lo tanto, el valor del pH cambiará muy lentamente cuando se añaden ácidos o bases.

La propiedad de actuar como solución tampón de la leche se pierde casi por completo cuando ésta se acidifica debido a un largo almacenamiento a altas temperaturas. En este caso sólo con una pequeña adición de ácido se podrá cambiar el valor del pH.

Enzimas de la leche

Las enzimas son un grupo de proteinas producidas por organismos vivos. Tienen la capacidad de provocar reacciones quimicas y de afectar el curso y la velocidad de tales reacciones. Las enzimas llevan a cabo su tarea sin ser consumidas. Por ello son llamadas con frecuencia biocatalizadores. El mecanismo de acción de las enzimas se puede ver en la Figura 2.36.

La acción de las enzimas es especifica. Cada tipo de enzima cataliza exclusivamente un tipo de reacción.

Dos factores que influyen de forma importante sobre la acción enzimática son la temperatura y el pH. Como norma, las enzimas son más activas a una temperatura cuyo óptimo oscila entre 25 y 50°C. Su actividad cae si la temperatura supera el óptimo antes citado, cesando completamente en algún punto situado entre los 50 y 120°C. A estas temperaturas, las enzimas son desnaturalizadas más o menos completamente (inactivadas). La temperatura de inactivación varía de un tipo de enzima a otro, circunstancia que ha sido ampliamente utilizada con objeto de determinar el grado de pasteurización de la leche. Las enzimas también tienen pH óptimos para su trabajo. Algunas funcionan mejor en soluciones ácidas, mientras que otras lo hacen mejor en medios alcalinos.

Las enzimas presentes en la leche tienen su origen en la ubre de la vaca o en las bacterias. Las primeras se consideran como componentes normales de la leche -son denominadas enzimas originales. Las otras, llamadas *enzimas bacterianas*, varian en tipo y abundancia según la naturaleza y tamaño de la población bacteriana. Algunas de estas enzimas de la leche se utilizan en controles de calidad. Entre las más importantes están la peroxidasa, catalasa, fosfatasa y lipasa.

Peroxidasa

La peroxidasa transfiere oxigeno del peróxido de hidrogeno (H_2O_2) hacia sustancias oxidables. Esta enzima es inactivada si la leche se calienta a 80°C durante unos pocos segundos, circunstancia que puede ser utilizada para demostrar la presencia o ausencia de peroxidasa en la leche, y, por tanto, para comprobar si la temperatura de pasteurización ha superado o no esos 80°C. Esta prueba se denomina test de la peroxidasa de Storch.

Catalasa

La catalasa desdobla el peróxido de hidrógeno en agua y oxígeno libre. Determinando la cantidad de oxígeno que la enzima puede liberar en la leche, es posible estimar su contenido de catalasa y saber si dicha leche proviene de un animal de ubres sanas. La leche de ubres enfermas tiene un mayor contenido en catalasa, mientras que la leche fresca de ubres sanas contiene solamente una cantidad muy pequeña. Sin embargo, hay muchas bacterias que producen este tipo de enzima. La catalasa se destruye mediante calentamiento a 75ºC durante 60 segundos.

Fosfatasa

La fosfatasa tiene la propiedad de desdoblar ciertos ésteres del ácido fosfórico en ácido fosfórico y los correspondientes alcoholes. La presencia de fosfatasa en la leche puede ser detectada mediante la adición de ester del ácido fosfórico y un reactivo que cambia el color cuando reacciona con el alcochol liberado. Un cambio en el color indica que la leche contiene fosfatasa. Esta enzima se destruye mediante una pasterización ordinaria (75ºC durante 15-20 segundos), por lo que la prueba de la fosfatasa puede ser utilizada para determinar si se ha alcanzado la temperatura de pasteurización. Esta es una prueba que se realiza de forma rutinaria en las centrales lecheras y se conoce como el test de la fosfatasa de Scharer.

La prueba de la fosfatasa se debe realizar preferentemente nada más terminado el tratamiento térmico. Si no se hace así, la leche debe ser enfriada por debajo de +5ºC y mantenida a esta temperatura hasta el momento del análisis. La prueba debe realizarse el mismo dia, ya que si no se hace así se puede producir el llamado fenómeno de reactivación, según el cual la enzima inactivada vuelve a ser nuevamente activa y da una lectura positiva en la prueba. La nata es particularmente susceptible en este sentido.

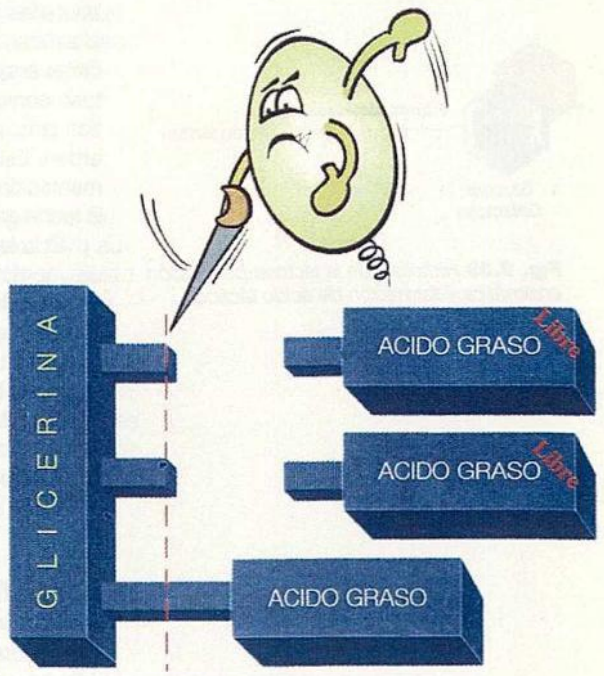


Fig. 2.37 *Dibujo esquemático de la hidrólisis de la grasa realizada por la enzima lipasa.*

Lipasa

La lipasa desdobla la grasa en glicerol y ácidos grasos libres. El exceso de ácidos grasos libres en la leche y en los productos lácteos da lugar a un sabor rancio. La acción de esta enzima parece, en la mayoría de los casos, ser muy débil, aunque la leche de algunas vacas muestra una actividad lipásica fuerte. La cantidad de lipasa en la leche se cree que aumenta hacia el final del ciclo de lactación. Esta enzima es inactivada en una gran medida mediante la pasteurización, pero se requieren temperaturas superiores para su total inactivacion. Muchos microorganismos producen lipasa. Esto puede acarrear problemas serios, ya que esta enzima es muy resistente al calor.

Lactosa

La lactosa es un azúcar que se encuentra solamente en la leche, y pertenece al grupo de los compuestos químicos orgánicos llamados hidratos de carbono o *carbohidratos*.

Los hidratos de carbono son la fuente más importante de energía en nuestra dieta. El pan y las patatas, por ejemplo, son ricos en hidratos de carbono y proporcionan una reserva en la nutrición. Se desdoblan en componentes ricos en energía que pueden tomar parte en todas las reacciones bioquímicas, suministrando la energía necesaria para que éstas se desarrollen. Los hidratos de carbono también suministran material para la síntesis de algunos compuestos químicos importantes presentes en el cuerpo. Se encuentran en los músculos como glucógeno muscular y en el hígado como glucógeno hepático.

El glucógeno es un ejemplo de hidrato de carbono con un gran peso molecular. Otros ejemplos son el almidón y la celulosa. A estos hidratos de carbono se les llama polisacáridos y tienen moléculas gigantes formadas por muchas moléculas de glucosa. En el glucógeno y en el almidón, las moléculas están frecuentemente ramificadas, mientras que en la celulosa no lo están, formando largas cadenas.

La Figura 2.38 muestra algunos disacáridos, que son hidratos de carbono compuestos de dos tipos de moléculas de azúcar. Las moléculas de sacarosa

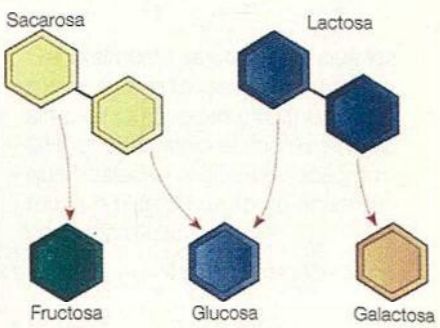


Fig. 2.38 *La lactosa y la sacarosa son hidrolizadas a galactosa, glucosa y fructosa.*

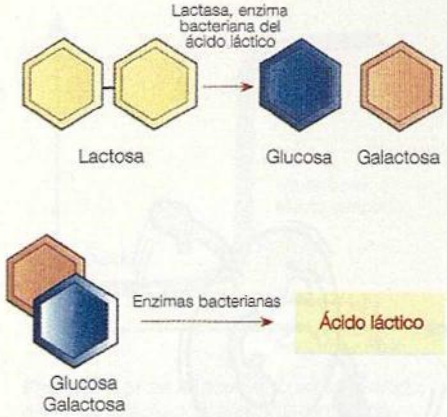


Fig. 2.39 *Hidrólisis de la lactosa por acción enzimática y formación de ácido láctico.*

(azúcar común de caña o remolacha) constan de dos azúcares simples (monosacáridos), que son la fructosa y la glucosa. La lactosa (azúcar de la leche) es también un disacárido, con una molécula que contiene los monosacáridos glucosa y galactosa.

En la Tabla 2.3 se veía que el contenido de lactosa de la leche varía entre 3.6 y 5.5 %. La Figura 2.39 muestra lo que sucede cuando la lactosa es atacada por bacterias lácticas. Estas bacterias contienen una enzima llamada lactasa que ataca al azúcar de la leche, desdoblando la molécula de lactosa en glucosa y galactosa. Otras enzimas de las bacterias lácticas atacan entonces a la glucosa y a la galactosa convirtiéndolas a través de complicadas reacciones intermedias en ácido láctico principalmente. Las enzimas implicadas en estas reacciones actúan con cierto orden. Esto es lo que sucede cuando la leche se agría, es decir, se produce la fermentación de la lactosa con formación de ácido láctico. Otros microorganismos en la leche generan otros productos de transformación de la lactosa.

Si la leche se calienta a alta temperatura y se mantiene asi, su color se oscurece y toma un sabor a caramelo. Este proceso es conocido como caramelización y es el resultado de una reacción química entre la lactosa y las proteinas, a la que se llama reacción de Maillard.

La lactosa es soluble en agua y se presenta como una solución molecular en la leche. En la elaboración del queso, la mayor parte de la lactosa queda disuelta en el suero. La evaporación del suero para la producción de lactosuero en polvo aumenta aún más la concentración de lactosa. El azúcar de la leche no es tan dulce como otros azúcares. Como ejemplo, podemos decir que es 30 veces menos dulce que el azúcar de caña.

Vitaminas de la leche

Las vitaminas son sustancias orgánicas que están presentes en muy bajas concentraciones en animales y plantas. Son esenciales para el normal desarrollo de la vida. La composición química de las vitaminas es normalmente muy compleja, aunque es conocida en la mayor parte de los casos. Se las designa por letras mayúsculas, seguidas en ocasiones por un subíndice numérico, como por ejemplo vitamina A, vitamina B_1, vitamina B_2.

La leche contiene muchas vitaminas. Entre las más conocidas figuran la A, B_1, B_2, C y D. Las vitaminas A y D son solubles en grasa, o en disolventes de la grasa, mientras que el resto son solubles en agua.

La Tabla 2.6 muestra las cantidades de las diferentes vitaminas que se encuentran en un litro de leche del mercado, así como las necesidades vitamínicas de una persona adulta. Esta tabla muestra que la leche es una buena fuente de vitaminas. La falta de vitaminas en la dieta puede resultar en la aparición de enfermedades carenciales, como las que se indican en la Tabla 2.7.

Tabla 2.6
Vitaminas de la leche y necesiades diarias

Vitamina	Cantidad en 1l de leche, mg	Necesidades diarias de un adulto, mg
A	0.2 - 2	1 - 2
B_1	0.4	1 - 2
B_2	1.7	2 - 4
C	5 - 20	30 - 100
D	0.002	0.01

Tabla 2.7
Carencias de vitaminas y enfermedades que provocan

Carencia de vitamina A	Ceguera nocturna, menor resistencia a enfermedades infecciosas.
Carencia de vitamina B_1	Crecimiento más lento.
Carencia de vitamina B_2	Pérdida de apetito, indigestión.
Carencia de vitamina C	Fatiga, piorrea, susceptibilidad a infecciones (escorbuto).
Carencia de vitamina D	Deformaciones del esqueleto (raquitismo)

Minerales y sales en la leche

La leche contiene un cierto número de minerales. Su concentración total es inferior al 1%. Las sales minerales se encuentran disueltas en el suero de la leche o formando compuestos con la caseina. Las sales más importantes scn las de calcio, sodio, potasio y magnesio. Se encuentran como fosfatos, cloruros, citratos y caseinatos. Las sales de potasio y calcio son las más abundantes en la leche normal. Las cantidades de sales presentes en la misma no son constantes. Hacia el final de la lactación, y aún más en el caso de ubres enfermas, el contenido de cloruro sódico aumenta lo que comunica a la leche un sabor salado, mientras que las cantidades de las otras sales se ven reducidas en una forma proporcional.

Otros constituyentes de la leche

La leche contiene siempre *células somáticas* (glóbulos blancos o leucocitos). Su contenido es bajo cuando se trata de leche procedente de ubres sanas, pero aumenta si se trata de una ubre enferma, normalmente en proporción a la severidad de la enfermedad. El contenido de células somáticas en la leche de animales sanos es como norma menor de 200.000 células/ml, pero se pueden aceptar recuentos de hasta 400.000 células/ml.

La leche también contiene gases disueltos, que significan el 5-6% en volumen de la leche fresca de la ubre, pero al llegar a la central lechera el contenido de gas puede ser hasta del 10% en volumen. Principalmente se trata de anhídrido carbónico, nitrógeno y oxigeno. Estos gases están en la leche de tres formas:

1. disueltos en la leche
2. ligados y, por lo tanto, no separables de la leche
3. dispersos en la leche

Los gases dispersos y disueltos constituyen un serio problema en el procesado de la leche, ya que están relacionados con el quemado de la leche sobre las superficies de calentamiento si tiene un contenido excesivo de gases.

Cambios en la leche y en sus componentes

Cambios durante el almacenamiento

La grasa y la proteina de la leche pueden sufrir cambios químicos durante el almacenamiento. Estos cambios son normalmente de dos tipos: oxidación y lipolisis. Los productos resultantes de la reacción pueden provocar sabores desagradables, principalmente en la leche y en la mantequilla.

Oxidación de la grasa

La oxidación de la grasa comunica a la leche un sabor metálico, mientras que a la mantequilla le da un sabor oleoso o seboso. La oxidación tiene lugar en los dobles enlaces de los ácidos grasos insaturados, siendo los de la lecitina lcs más susceptibles de ataque. La presencia de sales de hierro y cobre acelera la auto-oxidación y el desarrollo de la aparición del sabor metálico. El mismo efecto tiene la presencia de oxígeno disuelto y la exposición a la luz, especialmente la luz directa solar o la procedente de tubos fluorescentes.

La oxidación de la grasa puede en parte ser contrarrestada por los microorganismos presentes en la leche, por la pasteurización a temperaturas superiores a 80°C o por la adición de antioxidantes (agentes reductores) tales como el galato de dodecilo (DGA). La dosis máxima de DGA debe ser de 0,00005%. Los microorganismos tales como las bacterias lácticas consumen oxígeno por lo que tienen un efecto reductor. Los sabores anormales debidos a la oxidación tienen más posibilidades de presentarse a bajas temperaturas, debido a que las bacterias antes citadas son entonces menos activas. La solubilidad del oxígeno en la leche es también mayor a temperaturas bajas. La pasteurización a alta temperatura tiene un efecto beneficioso, ya que se forman compuestos reductores (-SH) en la leche como resultado del calentamiento.

El sabor metálico provocado por la oxidación es más común en invierno que en verano. Esto es en parte debido a las temperaturas ambientales más bajas y a las diferencias en la alimentación de las vacas. La alimentación en verano es más rica en vitaminas A y C, lo que aumentará la proporción de sustancias reductoras presentes en la leche.

Generalmente se considera que las moléculas de oxígeno en estado simple ($^1O_2$) pueden oxidar un grupo CH- directamente al mismo tiempo que trasladan el doble enlace y forman un hidroperóxido de acuerdo con la fórmula:

$$^1O_2 + \text{-CH = CH - CH}_2\text{-} \longrightarrow \text{-CHOOH - CH = CH-}$$

En presencia de la luz y/o de iones metálicos pesados, los ácidos grasos sufren una descomposición en sucesivos pasos hasta aldehidos y cetonas, que podrán aumentar los sabores desagradables a rancio sobre todo en los productos lácteos grasos.

Los procesos de oxidación (o más correctamente de auto-oxidación) de los ácidos grasos insaturados anteriormente explicados de forma muy resumida, pueden analizarse con más detalle en el libro titulado "Dairy Chemistry and Physics", de P. Walstra y R. Jennis.

Oxidación de las proteinas

Cuando se expone a la luz el aminoácido metionina se degrada para producir metional con la participación más o menos compleja de la riboflavina (Vitamina B_2) y el ácido ascórbico (Vitamina C). El metional o 3-mercapto-metilpropionaldehido es el principal causante del sabor a luz solar. Así se denomina este sabor desagradable.

Como la metionina no existe como tal en la leche, aunque sí es uno de los componentes de las proteinas de la leche, es la fragmentación de las proteinas la que puede dar lugar al desarrollo de este mal sabor.

Los factores que están relacionados con el mal sabor debido a la luz solar son:

- Intensidad de luz (luz solar y/o luz artificial, especialmente la de los tubos fluorescentes).
- Duración de la exposición.
- Ciertas propiedades de la leche (la leche homogeneizada es más sensible a estos procesos que la leche no homogeneizada).
- Naturaleza del envase (los envases opacos de plástico o papel son una buena protección en condiciones normales).

Ver también el Capítulo 8 sobre el mantenimiento de la calidad de la leche pasteurizada.

Lipolisis

El desdoblamiento de la grasa en glicerol y ácidos grasos libres se conoce como lipolisis. Las grasas que sufren esta reacción tienen un sabor y olor a rancio, causados por la presencia de ácidos grasos libres de molécula corta (ácidos butírico y caproico).

La lipolisis es causada por la acción de lipasas y es estimulada por temperaturas altas de almacenamiento. Pero la lipasa no puede actuar si los glóbulos de grasa no han sido previamente dañados por rotura de sus membranas, con lo que el interior queda expuesto al ataque de las citadas enzimas. Sólo entonces puede la lipasa actuar e hidrolizar las moléculas de grasa. En los tratamientos que normalmente se hacen en las industrias hay muchas oportunidades para que los glóbulos de grasa sean dañados, durante el bombeo, la agitación, etc. La agitación innecesaria de la leche sin pasteurizar debe ser, por lo tanto, evitada, ya que implica el riesgo de una acción lipásica generalizada con liberación de ácidos grasos que dan a la leche un sabor rancio. Para evitar que la lipasa desdoble la grasa se debe proceder a una inactivación de la misma por pasteurización a alta temperatura. Esto destruye completamente las enzimas originales. Las enzimas bacterianas son más resistentes. Ni siquiera los tratamientos UHT pueden destruirlas completamente. (El tratamiento UHT = Ultra High Temperature, implica un calentamiento a 135-150°C o más, durante pocos segundos).

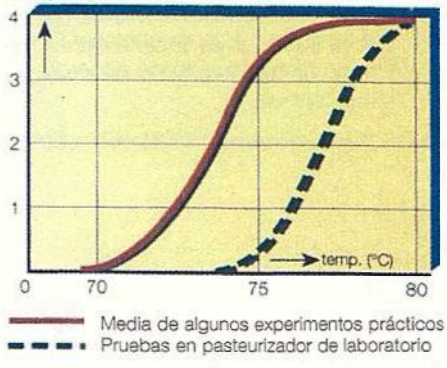


Fig. 2.40 *Formación de grumos de nata en función de la temperatura de pasteurización. Escala de 0 (sin efecto) a 4 (grumos de nata sólidos). Todos los tratamientos de pasteurización se han realizado con tiempo corto (alrededor de 15 s).*
Ref: Thomé &al.

Efectos del tratamiento térmico

La leche se trata térmicamente (se calienta) para destruir los microorganismos patógenos que pudieran estar presentes en la misma. El tratamiento térmico también provoca cambios en los componentes de la leche. Cuanto mayor es la temperatura y el tiempo de aplicación de dicha temperatura, mayores son los carnbios producidos. Dentro de ciertos límites, se pueden conseguir efectos parecidos con combinaciones distintas de tiempos y temperaturas. Un breve calentamiento a una alta temperatura puede tener el mismo efecto que un calentamiento a baja temperatura durante un prolongado periodo de tiempo. Por ello, tanto la temperatura como el tiempo deben considerarse globalmente en los tratamientos térmicos.

Grasa

Se ha demostrado (Thomé et al., Milchwissenschaft, 13: 115, 1958) que cuando se pasteuriza la leche a 70-80°C durante 15 segundos, el fenómeno de separación de la crema que se produce es ya evidente a 74°C (ver Figura 2.40). Varias teorías han sido discutidas, pero parece que las grasas libres liberadas cementan los gló-

bulos de grasa cuando éstos se encuentran en racimos. Por lo anterior se recomienda la homogeneización para evitar la separación de la crema y la formación de sombrero en superficie.

A. Flink y H.G. Kessler (Milchwissenschaft, 40:6-7, 1985) han mostrado la fuga de la grasa libre de los glóbulos en cremas con 30% de grasa, homogeneizada y no homogeneizada, cuando se calienta a temperaturas entre 105 y 135°C. Se cree que esto se produce a causa de la desestabilización de las membranas de los glóbulos, que ocasiona un incremento de la permeabilidad, ya que la grasa libre extraible actúa como cemento entre los glóbulos de grasa lo que produce racimos estables de glóbulos.

Por encima de 135°C las proteinas depositadas sobre las membranas de los glóbulos de grasa forman una red que comunica una cierta densidad a la membrana y la hace menos permeable. Por lo anterior, se recomienda realizar la homogeneización a continuación de la esterilización UHT de productos con un alto contenido graso.

Fig. 2.41 *Cuando se dañan las membranas de los glóbulos de grasa, la lipolisis puede dar lugar a ácidos grasos.*

Proteinas

La proteina más importante, la caseina, no se considera desnaturalizable por calor dentro de los rangos normales de pH, y contenidos de sal y proteinas.

Las seroproteinas, por otro lado, particularmente la β-lactoglobulina que constituye alrededor del 50% de las proteinas del suero de la leche, son claramente sensibles al calor. La desnaturalización comienza a 65°C y casi se completa cuando las proteinas se calientan a 90°C durante cinco minutos.

La desnaturalización por calor de las seroproteinas es una reacción de tipo irreversible. Las proteinas se agrupan al azar, pero en particular la β-lactoglobulina forma enlaces con la fracción de κ-caseina mediante puentes de azufre. Esta transformación se aprecia en la Figura 2.42.

El bloqueo de una gran proporción de κ-caseina interfiere con la capacidad de cuajado de la leche, ya que el cuajo utilizado en la fabricación del queso actúa en el desdoblamiento de las micelas de caseina justo en los puntos de κ-caseina. Cuanto mayor es la temperatura de pasteurización para un tiempo constante de mantenimiento, más blando es el coágulo. Este es un fenómeno indeseable en la producción de quesos de los tipos duros y semiduros. Por lo tanto, la leche que se vaya a utilizar para la fabricación de queso no ha de ser pasteurizada, o puede ser pasteurizada pero no a temperaturas superiores a 72°C durante más de 15-20 segundos.

En la leche destinada a la elaboración de productos lácteos fermentados (yogur, etc.), la desnaturalización de las seroproteinas y la interacción con la caseina que se obtiene mediante un tratamiento a 90-95°C durante 3-5 minutos contribuirá a mejorar la calidad ya que se reduce la sinéresis y mejora la viscosidad.

La leche que se calienta a 75°C durante 20-60 segundos comenzará a saber y oler a "cocido". Esto es debido a la liberación de compuestos que contienen azufre que provienen de la β-lactoglobulina y otras proteinas sulfuradas.

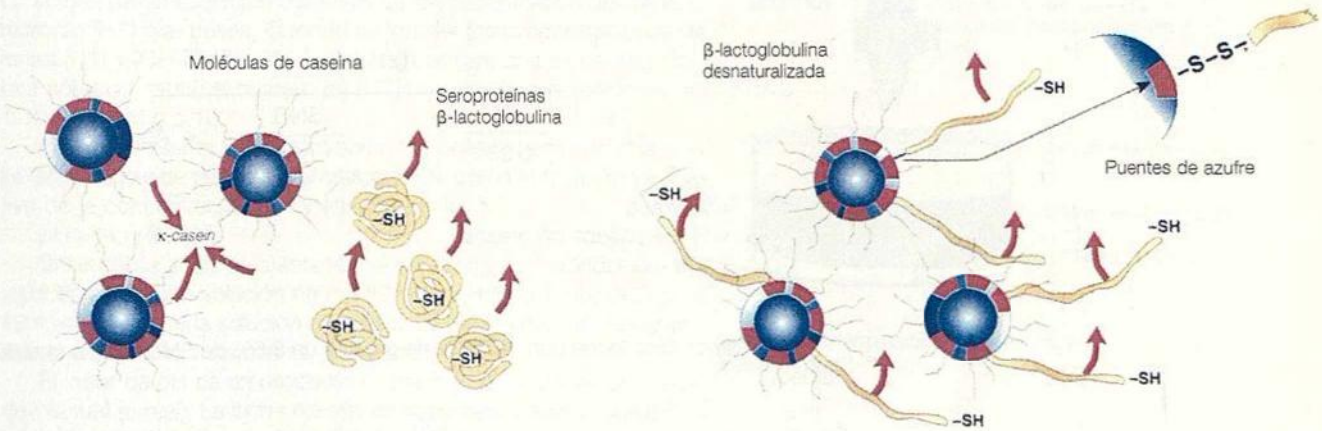


Fig. 2.42 *Durante la desnaturalización la κ-caseina se adhiere a la β-lactoglobulina.*

Enzimas

Las enzimas pueden ser inactivadas por calentamiento. La temperatura de inactivación varía según el tipo de enzima.

Existen algunas bacterias, *Pseudomonas spp* (spp=especies), actualmente muy citadas entre la flora de deterioro de la leche cruda almacenada refrigerada y de los productos lácteos tratados con calor, que tienen enzimas lipolíticos y proteolíticos extremadamente resistentes al calor. Sólo una parte de su actividad es inhibida por la pasteurización o tratamiento UHT de la leche.

Lactosa

A temperaturas superiores a 100°C tiene lugar una reacción entre la lactosa y las proteinas, dando lugar a un oscurecimiento del color.

La lactosa sufre cambios más visibles cuando está en la leche que cuando se encuentra como sólido seco. A temperaturas por encima de 100°C se produce una reacción entre la lactosa y las proteinas, produciéndose un pardeamiento de la leche. Esta serie de reacciones, que ocurren entre los grupos amino de los residuos de aminoácidos y los grupos aldehido de los carbohidratos de la leche, se llama reacción de Maillard o reacción de pardeamiento. Se produce un pardeamiento u oscurecimiento del producto y un cambio del sabor junto a una pérdida de valor nutritivo, concretamente se produce una pérdida de lisina, que es uno de los aminoácidos esenciales.

Vitaminas

La vitamina C es la más sensible al calor, especialmente en presencia de aire y de ciertos metales. La pasteurización en un intercambiador de calor de placas puede, sin embargo, llevarse a cabo sin prácticamente ninguna pérdida de vitamina C. Las otras vitaminas presentes en la leche apenas si sufren con calentamientos moderados.

Sales minerales

De las sales minerales presentes en la leche, sólo el hidroxifosfato cálcico, que se encuentra en las micelas de caseina, se ve afectado por el calentamiento. Cuando se calienta por encima de los 75°C pierde agua y forma ortofosfato cálcico insoluble, que altera las propiedades queseras de la leche. Por lo anterior, se debe de seleccionar cuidadosamente la intensidad del tratamiento térmico.

Propiedades físicas de la leche

Apariencia

El aspecto opaco de la leche se debe a su contenido en partículas en suspensión, de grasa, proteinas y ciertas sales minerales. El color varía desde blanco a amarillo, según la coloración de la grasa (determinada por el contenido de caroteno). La leche desnatada es más transparente, con un ligero tinte azulado.

Densidad

La densidad de la leche de vaca varía normalmente entre 1.028 y 1.038 g/cm^3, dependiendo de su composición.

La densidad de la leche a 15.5°C puede ser calculada mediante la siguiente fórmula:

$$d\ 15.5°C = \frac{100}{\frac{G}{0.93} + \frac{SNG}{1.608} + Agua}\ g/cm^3$$

G = % grasa
SNG = % de sólidos no grasos
Agua = 100 - G - SNG

Ejemplo: Una leche con un 3.2% de grasa y un 8.5% de SNG tendrá una densidad:

$$d\ 15.5°C = \frac{100}{\frac{3.2}{0.93} + \frac{8.5}{1.608} + (100 - 3.2 - 8.5)} = 1.0306\ g/cm^3$$

Presión osmótica

La presión osmótica viene controlada por el número de moléculas o partículas, no por el peso de soluto. Por lo anterior 100 moléculas de tamaño 10 tendrán 10 veces la presión osmótica de 10 moléculas de tamaño 100.

Tabla 2.8
Presión osmótica en la leche

Constituyente	Peso molecular	Conc. normal (%)	Presión osmótica atm	D °C	% de la presión osmótica total
Lactosa	342	4.7	3.03	0.25	46
Cloruros, ClNa	58.5	≈0.1	1.33	0.11	19
Otras sales, etc.	–	–	2.42	0.20	35
Total			6.78	0.560	100

D = Depresión del punto de congelación en °C.

De aquí se deduce que para un peso dado, cuanto más pequeñas son las moléculas mayor es la presión osmótica. La leche se forma a partir de sangre, y ambas sustancias son separadas mediante una membrana permeable. De aquí que ambas tengan la misma presión osmótica, o en otras palabras, la leche es isotónica con la sangre. La presión osmótica de la sangre es muy constante, a pesar de que su composición en pigmentos, proteínas, etc., varíe. La misma propiedad tiene la leche, la presión osmótica total se obtiene tal como se indica en la Tabla 2.8.

Punto de congelación

El punto de congelación de la leche es el único parámetro fiable para detectar una adulteración con agua. El punto de congelación de la leche de vacas individuales varía entre -0.54 y -0.59°C.

En este contexto es interesante comentar que cuando la leche se expone a un tratamiento a alta temperatura (tratamiento UHT o esterilización), la precipitación de algunos fosfatos que se produce causará un aumento del punto de congelación.

La presión interna o presión osmótica también define la diferencia de punto de congelación entre la solución y el disolvente (agua) ya que la depresión del punto de congelación (D en la Tabla 2.8) es una medida de esta presión osmótica. Cuando se altera la composición de la leche debido a causas fisiológicas o patológicas (por ejemplo, lactación tardía y mastitis), se habla de leche anormal aunque la presión osmótica y el punto de congelación permanezcan constantes. El cambio más importante es una caida en el contenido de lactosa y un aumento del contenido de cloruro.

Acidez

La acidez de una solución depende de la concentración de iones hidronio [H^+] que posea. Cuando se igualan las concentraciones de iones [H^+] y [OH^-] (hidroxilo), la solución se dice que es neutra. En una solución neutra el número de [H^+] por litro de la solución es 1:10 000 000 g o 10^{-7}.

El pH representa la concentración de iones hidronio de una solución y se puede definir matemáticamente como el logaritmo negativo de la concentración de iones hidronio [H^+].

$pH = -\log [H^+]$

Si se aplica al ejemplo anterior, el $pH = -\log 10^{-7} = 7$ que es el valor típico de una solución neutra. Cuando [H^+] es 1:100 000 g/l o 10^{-6}, el pH es 6 y la solución es ácida. De aquí que cuanto menor sea el exponente, más alta será la acidez.

El valor de pH de un producto o una solución representa la acidez actual (o real). La leche normal es ligeramente ácida, con un pH entre 6.5-6.7, siendo el pH 6.6 el más usual. La temperatura de medida ha de ser próxima a 25°C. El pH se determina mediante un pH-metro (peachímetro).

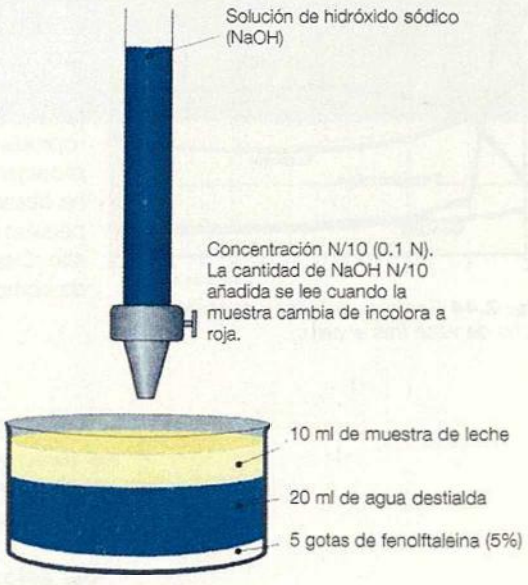


Fig. 2.43 *Determinación de la acidez en grados Thörner, °Th.*

Acidez titulable

La acidez también se puede expresar como acidez titulable. La acidez titulable de la leche es la cantidad de una solución de iones hidroxilo (OH^-), de una concentración dada, que se necesita para incrementar el pH de una cantidad determinada de leche hasta un pH de alrededor de 8.4, que es el pH al cual el indicador normalmente utilizado, la fenolftaleina, cambia de color desde incoloro hasta rosáceo. Lo que realmente hace este test es encontrar la cantidad de solución alcalina que se necesita para aumentar el pH desde 6.6 hasta 8.4.

Si la leche se agría a causa de una cierta actividad bacteriana, se necesitará más solución alcalina, por lo que aumentará el valor de acidez o de titulación de la leche.

La acidez titulable se puede expresar de distintas maneras, según sea de fuerte la solución de hidróxido sódico (NaOH) utilizada en el test.

SH = grados Soxhlet Henkel, que se obtienen titulando 100 ml de leche con NaOH N/4, utilizando fenolftaleina como indicador. La leche normal da valores de alrededor de 7. Este método es el más usado en Europa Central.

°Th = grados Thörner, que se obtienen titulando 100 ml de leche, diluidos con 2 partes de agua destilada, con NaOH N/10 y usando fenolftaleina como indicador. La leche normal da valores de alrededor de 17. Se utiliza sobre todo este método en Suecia y en los paises de la CIS.

°D = grados Dornic, que se obtienen mediante titulación de 100 ml de leche con NaOH N/9, y utilizando fenolftaleina como indicador. Las leches normales dan valores entorno a 15. Este método se utiliza sobre todo en Francia y Holanda.

% a.l. = porcentage de ácido láctico, que se obtiene dividiendo por 100 los °D que resultan. Se utiliza frecuentemente en USA, Canadá, Australia y Nueva Zelanda.

En la Tabla 2.9 se muestra la correspondencia entre las distintas expresiones utilizables para la acidez titulable. La determinación de la acidez conforme al método de los grados Thörner se puede ver en la Figura 2.43.

Tabla 2.9
La acidez se expresa normalmente de las siguientes maneras.

°SH	°Th	°D	%l.a.
1	2.5	2.25	0.0225
0.4	1	0.9	0.009
4/9	10/9	1	0.01

Ejemplo:
1.7 ml de NaOH N/10 se necesitan para la titulación de una muestra de leche de 10 ml. Por lo tanto se necesitarán 10x1.7 = 17 ml para 100 ml. La acidez de la leche será de 17°Th.

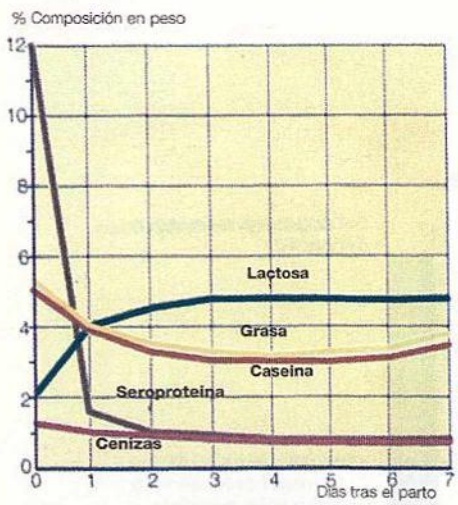


Fig. 2.44 *Cambios de composición de la leche de vaca tras el parto.*

Calostros

La primera leche que da una vaca después del parto es el calostro. Difiere bastante de la leche normal en composición y propiedades. Una de las características que más la distingue es su alto contenido de seroproteinas (alrededor de un 11% frente al 0.65% de la leche normal), tal como se indica en la Figura 2.44. Esto hace que el calostro coagule cuando es calentado. Una cierta proporción de las seroproteinas son inmunoglobulinas (Ig G es la que predomina en el calostro), que protegen al ternero de infecciones hasta que su propio sistema inmunológico se ha desarrollado. El calostro tiene un color entre amarillo y amarillo marrón, con un peculiar olor y un sabor más bien salado. El contenido de catalasa y peroxidasa es alto. Después de 4 ó 5 dias a partir del parto, la vaca comienza a producir leche de composición normal, que puede mezclarse con otra leche.

Capítulo 3

Reología

En el diseño de plantas de procesado de alimentos se han de tener en cuenta toda una serie de factores importantes, con el fin de asegurar la calidad del producto final. Uno de ellos es el comportamiento reológico.

En la industria láctea, en particular, se tiene nata y productos lácteos fermentados cuyas características pueden ser parcialmente o totalmente alteradas si su comportamiento al flujo no se conoce suficientemente. Lo que se desarrolla a continuación es una breve introducción al comportamiento al flujo de distintos productos lácteos típicos.

Definición

La Reología se define como la ciencia de la deformación y el flujo de la materia

La reología se define como la ciencia de la deformación y el flujo de la materia. El término en sí mismo procede de la palabra griega *rheos* que significa flujo. La reología se puede aplicar a todos los tipos de materiales, desde gases a sólidos.

La ciencia de la reología es joven, sólo tiene unos 70 años de edad, pero su historia es muy antigua. En el Libro de los Jueces en el Antiguo Testamento la profetisa Deborah decía "Las montañas fluían ante el Señor ... ", que traducido en términos reológicos por el profesor M. Reiner, esta expresión quiere decir que *cualquier cosa fluye si se espera lo suficiente*, una afirmación que es ciertamente aplicable a la reología. Era también descrito por el filósofo griego Heráclito como "panta rei" -*todo fluye*. El profesor Reiner, junto con el profesor E. Bingham, fueron los fundadores de la ciencia de la reología a mediados de los años 20.

La reología se utiliza en la ciencia de los alimentos para definir la *consistencia* de diferentes productos. Reológicamente, la consistencia viene descrita por dos componentes, la *viscosidad* (lo "espeso" que es un producto, o dificultad para deslizarse) y la *elasticidad* ("tenacidad", estructura). En la práctica, la reología será útil para *medir la viscosidad*, la *caracterización del comportamiento al flujo* y la *determinación de la estructura del material*. Un conocimiento básico de estos temas es esencial para el diseño del proceso y la evaluación de la calidad del producto.

Caracterización de materiales

Uno de los principales objetivos de la reología es la definición y la clasificación de los materiales. El vidrio normal, por ejemplo, es definido habitualmente como un material sólido, pero si se mide el espesor de la vidriera de una ventana de una vieja iglesia se comprobarán diferencias de espesor entre la parte superior y la parte inferior de la ventana. De hecho el vidrio *fluye como un líquido*, aunque muy lentamente.

Un parámetro que servirá para caracterizar un material es el *tiempo de relajación*, que es el tiempo requerido para reducir un esfuerzo (*stress*) en el material mediante el flujo. Valores típicos de los tiempos de relajación para los materiales son:

Gases	$<10^{-6}$	segundos
Líquidos	$10^{-6} - 10^{2}$	segundos
Sólidos	$>10^{2}$	segundos

Otra forma de definir reológicamente los materiales sería a través de los términos *viscoso*, *elástico* o *viscoelástico*. Los gases y los líquidos se describen normalmente como fluidos viscosos. Un fluido viscoso ideal es incapaz de almacenar cualquier *energía de deformación*. De aquí que sea deformado irreversiblemente cuando se le somete a cualquier esfuerzo, ya que *fluye* y la energía de deformación se disipa como calor, produciéndose un aumento de la temperatura.

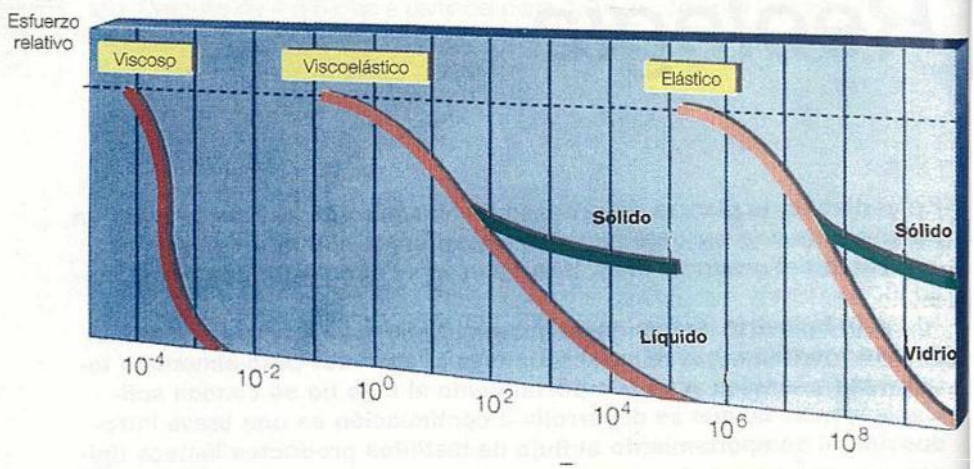


Fig. 3.1 *Curvas mostrando las diferencias entre los materiales viscosos, viscoelásticos y elásticos sometidos a deformación.*

Los sólidos, por otro lado, se describen normalmente como materiales elásticos. Un material elástico ideal almacena toda la energía de deformación que se le imponga, por lo que una vez liberado del stress se recuperará totalmente. Un fluido viscoso puede por tanto ser descrito como un fluido que se resiste a *comenzar a deformarse* (se resiste frente a la acción de deformación) más que resistir un *estado de deformación*, mientras que un material elástico resiste la acción y el estado de deformación.

Ciertos materiales muestran propiedades tanto viscosas como elásticas. Almacenan parte de la energía de deformación en su estructura mientras que otra parte la pierden mediante el flujo. Estos materiales se denominan viscoelásticos. Existen muchos ejemplos entre los distintos alimentos.

Deslizamiento de capas de producto, esfuerzo cortante y gradiente de velocidad

En reología, el conocimiento de cómo se produce el deslizamiento de capas de un producto es la clave para conocer su comportamiento al flujo y su estructura. El flujo o movimiento de capas de producto deslizándose unas sobre otras de forma ordenada, tal como se ve en la Figura 3.2, se consigue mediante flujo de la sustancia entre planos paralelos, flujo rotacional entre cilindros coaxiales donde un cilindro es estacionario y el otro es rotatorio, flujo telescópico a través de capilares y tuberías, y flujo de torsión entre placas paralelas.

Para facilitar el estudio de la viscosidad de un material, el deslizamiento de capas de producto, unas sobre otras, se debe provocar induciendo un flujo estacionario del material. El flujo ocurre a través de un sucesivo reordenamiento y deformación de partículas y a través de una rotura de enlaces que se tienen en la estructura del material.

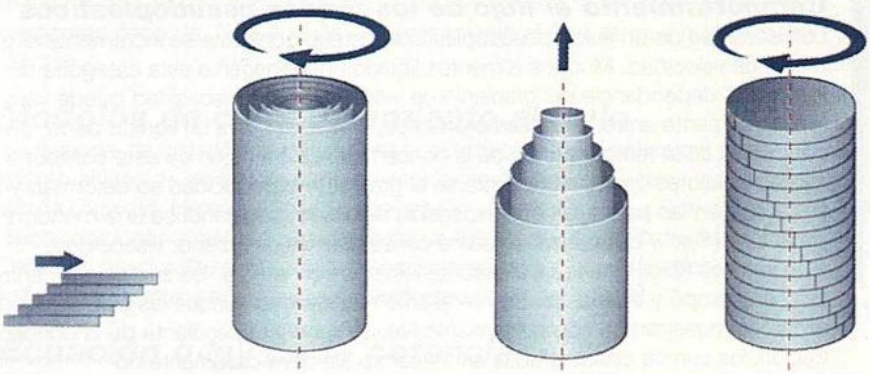


Fig. 3.2 *Diferentes tipos de deslizamiento de capas de producto.*

El esfuerzo cortante se define como

$$\sigma_{yx} = \frac{F}{A} \quad [Pa]$$

F = Fuerza, N

A = Area, m^2

el gradiente de velocidad sería

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{dv}{dy} \quad [1/s]$$

y la viscosidad aparente del fluido se define como:

$$\eta_a = \sigma / \dot{\gamma} \quad [Pas]$$

Si se quiere estudiar la elasticidad (estructura) de un material, esa inducción del movimiento de capas unas sobre otras se debe hacer de una forma muy suave para evitar la rotura de la estructura. Una manera de conseguir esto es mediante la aplicación de un esfuerzo cortante oscilante al material con una amplitud baja para poder estudiar la estructura sin romperla.

La inducción del movimiento de capas de producto unas sobre otras provocando el flujo entre planos paralelos se utiliza normalmente para definir el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad, conceptos que se corresponden respectivamente con la intensidad de deformación aplicada y la intensidad de respuesta del material.

Fluidos Newtonianos

Los fluidos Newtonianos son aquellos que tienen una viscosidad constante, que dependerá de la temperatura pero no del esfuerzo cortante aplicado. También se puede decir que los fluidos Newtonianos presentan una proporcionalidad directa entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad que se obtiene en situación de flujo laminar.

$$\sigma_{yx} = \eta \cdot \frac{dv}{dy} = \eta \cdot \dot{\gamma}$$

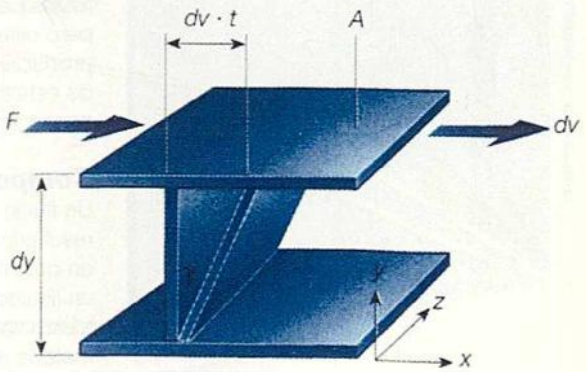


Fig. 3.3 *La definición de esfuerzo cortante y gradiente de velocidad se basa en el deslizamiento entre planos paralelos.*

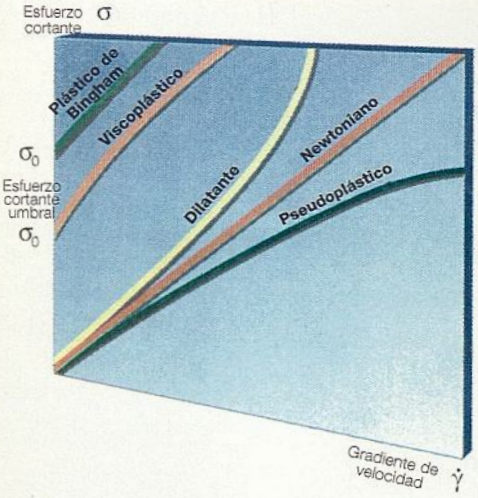


Fig. 3.4 *Curvas de flujo de fluidos Newtonianos y no-newtonianos*

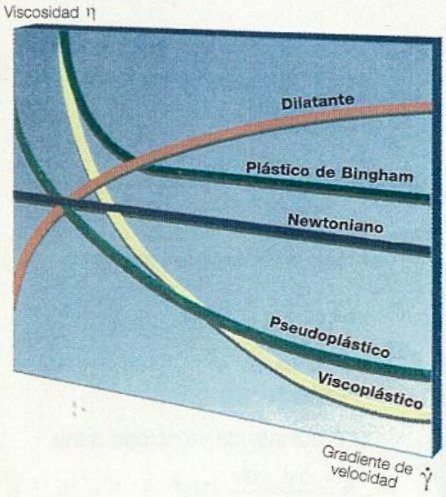


Fig. 3.5 *Curvas de viscosidad de fluidos Newtonianos y no-newtonianos.*

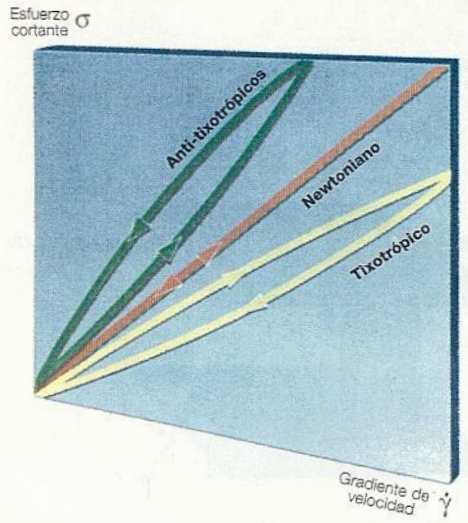


Fig. 3.6 *Curvas de flujo para fluidos no-Newtonianos dependientes del tiempo.*

La constante de proporcionalidad será por tanto la viscosidad del material. La *curva de flujo* para un fluido Newtoniano, es decir la gráfica donde se representa el esfuerzo cortante frente al gradiente de velocidad, será una línea recta con pendiente η. La *curva de viscosidad*, donde se representa la viscosidad frente al gradiente de velocidad, será una linea recta con un valor constante e igual a η.

De esta forma, un fluido Newtoniano se puede definir mediante un único valor de viscosidad para una determinada temperatura. El agua, los aceites minerales y vegetales y las soluciones puras de sacarosa son ejemplos de fluidos Newtonianos. Los líquidos diluidos, de baja concentración en general, tales como la leche entera y desnatada, se pueden considerar a efectos prácticos como fluidos Newtonianos.

Fluidos no-Newtonianos

Los materiales que no se pueden definir mediante un único valor de viscosidad para una determinada temperatura se denominan fluidos *no-Newtonianos*. La viscosidad de estos materiales debe referirse siempre a una determinada temperatura y gradiente de velocidad. Si se cambia el gradiente de velocidad cambiará la viscosidad. En general, las altas concentraciones y las bajas temperaturas inducen o incrementan el comportamiento no-Newtoniano.

Además de ser dependiente del gradiente de velocidad, la viscosidad de los fluidos no-Newtonianos puede también depender del tiempo, en cuyo caso la viscosidad es una función no sólo de la magnitud del gradiente de velocidad sino también de la duración y, en muchos casos, de la frecuencia de las sucesivas aplicaciones de esfuerzo cortante. Los materiales no-Newtonianos que son independientes del tiempo se definen como pseudoplásticos, viscoelásticos o plásticos. Los materiales no-Newtonianos que son dependientes del tiempo se definen como tixotrópicos, reopécticos o anti-tixotrópicos.

Comportamiento al flujo de los fluidos pseudoplásticos

La viscosidad de un fluido pseudoplástico decrece conforme se incrementa el gradiente de velocidad. Muchos alimentos líquidos pertenecen a esta categoría de fluidos. La dependencia del gradiente de velocidad de la viscosidad puede variar sustancialmente entre diferentes productos, y también para un líquido dado, dependiendo de la temperatura y de la concentración. La razón de este comportamiento al flujo es que al incrementarse el gradiente de velocidad se deforman y/o se reordenan las partículas en suspensión del fluido, originándose una menor resistencia al flujo y obteniéndose como consecuencia una menor viscosidad.

Ejemplos típicos de fluidos pseudoplásticos son la nata, los zumos concentrados, el champú y las salsas. Es interesante resaltar que aunque las soluciones de sacarosa muestran un comportamiento Newtoniano independiente de la concentración, los zumos concentrados se muestran siempre claramente no-Newtonianos.

Comportamiento al flujo de los fluidos dilatantes

La viscosidad de estos fluidos aumenta conforme se incrementa el gradiente de velocidades. Este tipo de comportamiento al flujo se aprecia generalmente en las suspensiones de concentración muy elevada. Estos fluidos presentan un comportamiento al flujo dilatante. Por ejemplo, los disolventes actúan como lubricante entre las partículas en suspensión cuando se tienen bajos gradientes de velocidad, pero este efecto desaparece cuando esos gradientes de velocidad se aumentan, produciéndose un empaquetamiento más denso de las partículas. Ejemplos típicos de este tipo de fluidos son las suspensiones de arena húmeda y las suspensiones concentradas de almidón.

Comportamiento al flujo de los fluidos plásticos

Un fluido que presenta un esfuerzo cortante umbral se denomina fluido plástico. El resultado práctico de este tipo de comportamiento al flujo es que se debe aplicar un determinado esfuerzo cortante antes de que el material comience a fluir como un líquido (este comportamiento a menudo se denomina *efecto ketchup*). Si el esfuerzo cortante aplicado es más pequeño que un determinado esfuerzo umbral, el material almacena la energía de deformación, mostrando por ejemplo propiedades elásticas, presentando un comportamiento como de sólido. Una vez que se supera ese esfuerzo cortante umbral, el líquido puede fluir como un fluido Newtoniano (denominándose entonces como líquido plástico de Bingham), o puede fluir como un líquido pseudoplástico (denominándose como líquido viscoplástico).

Fluidos tipicamente plásticos son la pasta de tomate, la pasta de dientes, la crema de las manos, ciertos ketchups y mantecas.

Comportamiento al flujo tixotrópico

Un fluido tixotrópico puede ser descrito como un sistema pseudoplástico donde la viscosidad decrece no sólo con el aumento del gradiente de velocidad sino también con el tiempo, para un gradiente de velocidad constante. El comportamiento al flujo tixotrópico se estudia normalmente en una prueba donde el material se somete a gradientes de velocidad crecientes y a continuación se le somete a gradientes de velocidad decrecientes. El comportamiento al flujo tixotrópico dependiente del tiempo se deduce de la diferencia entre las curvas así obtenidas, donde las viscosidades y los esfuerzos cortantes son crecientes primero y decrecientes después. Para recuperar su estructura, el material debe quedar en reposo durante cierto tiempo que es característico de cada material. Este tipo de comportamiento al flujo lo presentan todos los sistemas gelificantes. Ejemplos típicos de fluidos tixotrópicos son el yogur, la mayonesa, la margarina y los helados de crema.

Comportamiento al flujo reopéctico

Un fluido reopéctico se puede describir como un fluido tixotrópico pero con la diferencia de que la estructura del fluido sólo se recuperará completamente si se le somete a un gradiente de velocidad pequeño. Esto significa que un fluico reopéctico no recuperará su estructura si se le deja en reposo.

Comportamiento al flujo anti-tixotrópico

Un fluido anti-tixotrópico puede ser descrito como un sistema dilatante, donde se incrementa la viscosidad con el incremento del gradiente de velocidad, pero también se incrementa con el tiempo aunque el gradiente de velocidad se mantenga constante. Como en los fluidos tixotrópicos, el comportamiento al flujo es ilustrado mediante una prueba similar de gradientes de velocidad crecientes primero y decrecientes después. Este tipo de comportamiento al flujo es muy raro en los alimentos.

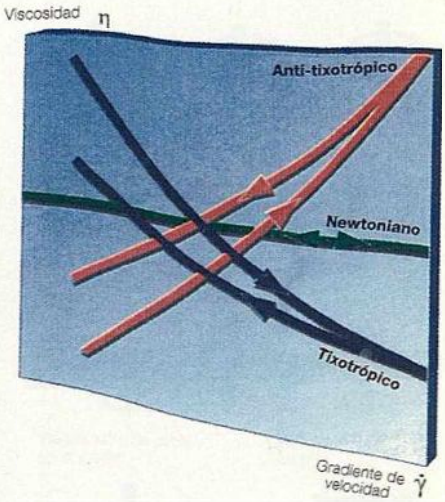


Fig. 3.7 *Curvas de viscosidad de fluidos no-newtonianos dependientes del tiempo*

Modelos de comportamiento al flujo

Se dispone de distintos modelos para la descripción matemática del comportamiento al flujo de los sistemas no-Newtonianos. Ejemplos de tales modelos son los de *Ostwald, Herschel-Bulkley, Steiger-Ory, Bingham, Ellis y Eyring.* Estos modelos relacionan el esfuerzo cortante de un fluido con el gradiente de velocidad. De estas relaciones se deduce la viscosidad aparente, como la relación entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad.

Ecuación o ley de la potencia

El modelo más general, con mucho, es el de Herschel-Bulkley, también denominado *ecuación o ley de la potencia generalizada,* que es en principio una extensión del modelo de Ostwald. La principal ventaja de esta ecuación de la potencia generalizada es su aplicabilidad a un gran número de fluidos no-Newtonianos en un amplio rango de gradientes de velocidad. Además, la ecuación de la potencia permite un tratamiento matemático fácil, por ejemplo en el cálculo de las pérdidas de carga y de la transferencia de calor.

La ecuación de la potencia generalizada se aplica a fluidos plásticos, pseudoplásticos y dilatantes, y tiene la forma:

$$(\sigma - \sigma_0) = k \cdot \dot{\gamma}^n$$

donde

σ = esfuerzo cortante, Pa

σ_0 = esfuerzo cortante umbral, Pa

K = coeficiente de consistencia, Pas^n

$\dot{\gamma}$ = gradiente de velocidad, s^{-1}

n = indice de comportamiento al flujo, adimensional

Una modificación apropiada de esta ecuación de la potencia generalizada hace posible reescribirla para expresar cada tipo de comportamiento al flujo.

Para los fluidos Newtonianos la ecuación de la potencia quedaría como: (K = η y n = 1):

$$\sigma = k \cdot \dot{\gamma}^n = \eta \cdot \dot{\gamma}$$

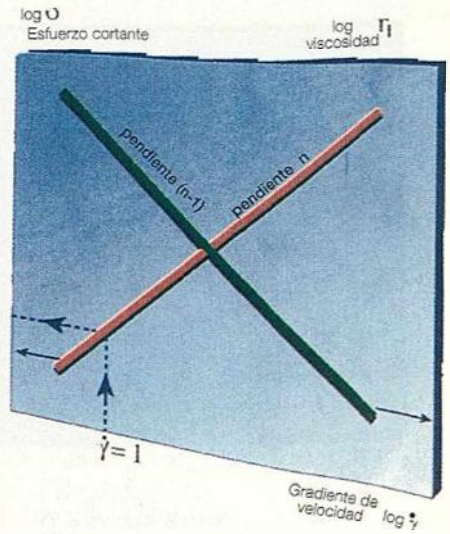


Fig. 3.8 *Curvas de flujo y viscosidad para fluidos pseudoplásticos que cumplen con la ley de la potencia.*

Para un fluido plástico, la ecuación de la potencia se utiliza en la forma totalmente generalizada, con n<1 para comportamiento viscoplástico y n=1 para el comportamiento de plástico de Bingham.

Para fluidos pseudoplásticos y dilatantes la ecuación de la potencia tendría la forma:

$$\sigma = k \cdot \dot{\gamma}^{n}$$

con $n < 1$ y $n > 1$ respectivamente.

Para los fluidos dependientes del tiempo, que en la práctica se reducen a los fluidos tixotrópicos, los modelos matemáticos que se necesitan para la descripción del comportamiento reológico son generalmente bastante más complejos que los modelos discutidos anteriormente. Estos fluidos son a menudo descritos mediante *viscosidades de proceso* independientes del tiempo normalmente ajustadas a la ecuación de la potencia.

Datos usuales

Algunos datos típicos de gradientes de velocidad, viscosidades, constantes de la ecuación de la potencia (valores de n y K), y esfuerzo cortante umbral a temperatura ambiente (a excepción de los polímeros fundidos y del vidrio fundido), son:

Gradientes de velocidad	sedimentación	10^{-6} - 10^{-4}	s^{-1}	
	amasado	10^{1} - 10^{2}	s^{-1}	
	agitación	10^{1} - 10^{3}	s^{-1}	
	bombeo	10^{2} - 10^{3}	s^{-1}	
	rociado	10^{3} - 10^{4}	s^{-1}	
	sobado	10^{4} - 10^{5}	s^{-1}	
Viscosidades	aire	10^{-5}	Pas	
	agua	10^{-3}	Pas	
	aceite de oliva	10^{-1}	Pas	
	glicerol	10^{0}	Pas	
	jarabe	10^{2}	Pas	
	polímeros fundidos	10^{3}	Pas	
	vidrio fundido	10^{12}	Pas	
	vidrio	10^{40}	Pas	
Valores de n y K	concentrado de fruta	n = 0.7	K = 2	Pas^{n}
	chocolate fundido	n = 0.5	K = 50	Pas^{n}
	leche agria	n = 0.3	K = 3	Pas^{n}
	cuajada	n = 0.3	K = 4	Pas^{n}
	puré de manzana	n = 0.3	K = 10	Pas^{n}
	pasta de tomate	n = 0.2	K = 70	Pas^{n}
	manteca	n = 0.1	K = 1000	Pas^{n}
Esfuerzo cortante umbral	ketchup	14 Pa		
	mostaza	38 Pa		
	mayonesa	85 Pa		

La unidad de viscosidad es Pas (Pascal segundo), que es igual a 1000 mPas o 1000 cP (centipoise). Es importante remarcar que los valores citados de viscosidades deben ser considerados como de referencia (y a temperatura ambiente) y NO deben ser utilizados en cálculos.

Equipos de medida

Los principales tipos de viscosímetros son los rotatorios y los capilares. Los viscosímetros rotatorios son de los tipos: de huso rotatorio, de cono y plato, de plato y plato, y de cilindros concéntricos. El último tipo puede ser del tipo *Searle* (de péndulo rotatorio) o *Couette* (de copa rotatoria). Los viscosímetros capilares pueden ser del tipo atmosférico (de flujo por gravedad) o presurizado (de flujo forzado). En general, los viscosímetros rotatorios son más fáciles de usar y más flexibles que

los viscosímetros capilares. Por otro lado, los viscosímetros capilares son más precisos a bajas viscosidades y a mayores gradientes de velocidad.

Las medidas de fluidos no-Newtonianos requieren instrumentos donde el gradiente de velocidad aplicado es cuidadosamente definido, y donde el flujo del fluido tiene lugar en un espacio muy estrecho con pequeños gradientes de velocidad. Este requerimiento fundamental excluye los viscosímetros donde el espacio de flujo es demasiado grande o no definido uniformemente, como es el caso de los viscosímetros de huso rotatorio.

Es necesario remarcar que las medidas de viscosidad de fluidos no-Newtonianos llevadas a cabo de forma indefinida o con gradientes de velocidad fuera de rango, no deben ser usadas como base de análisis cuantitativos de viscosidad o de parámetros reológicos.

Los viscosímetros rotatorios pueden ser del tipo portátil o fijo. Los instrumentos de tipo portátil normalmente vienen en maletines acolchados contra golpes y equipados con todos los accesorios necesarios. Se manejan básicamente de forma manual, aunque algunos fabricantes de estos equipos proporcionan conexiones que permiten su uso con ordenadores personales.

Las instalaciones fijas actualmente se manejan y controlan desde un ordenador acoplado, lo que permite la automatización de las medidas secuenciales y la evaluación/procesado de los datos. El software normalmente incluye el ajuste a distintos modelos reológicos, la representación gráfica de las curvas de flujo, etc.

Un viscosímetro rotatorio es normalmente insuficiente para llevar a cabo un análisis reológico completo, por ejemplo para la determinación de la rotura de la estructura en un yogur. Este tipo de análisis necesita un instrumento más sofisticado, normalmente denominado reómetro. Con un reómetro, que funciona por vibración torsional u oscilación más que por rotación, el fluido puede ser analizado reológicamente sin que se destruya su estructura. Normalmente, este tipo de instrumento se utiliza en fluidos viscoelásticos, para determinar separadamente sus propiedades viscosas y elásticas.

Los viscosímetros y reómetros normales no se deben utilizar para medidas de sustancias con viscosidades muy altas, como es el caso de la mantequilla, queso, grasas vegetales, etc. Ciertos tipos de penetrómetros se utilizan para estos casos, aunque no se pueden utilizar para obtener datos reológicos de tipo científico. Un penetrómetro da sólo información empírica.

Fig. 3.9 *Principios de operación de los diferentes tipos de viscosímetros.*

Técnicas de medida

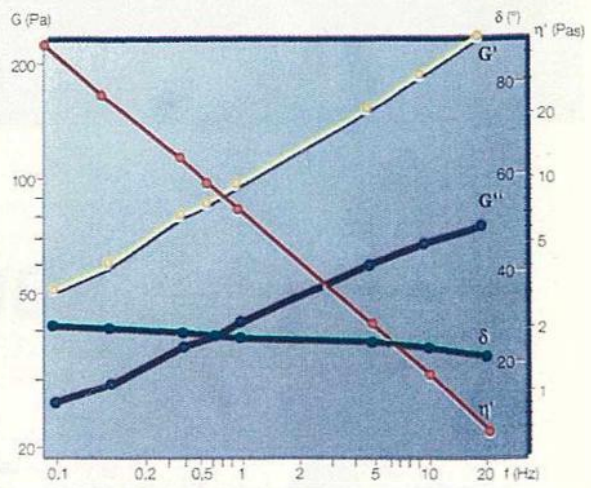
Las medidas de viscosidad siempre se han de llevar a cabo en un rango representativo de gradientes de velocidad y temperaturas relacionados con el proceso en estudio. Antes de realizar las medidas se ha de saber para qué van a ser utilizados los resultados. Por ejemplo, se ha de saber si los datos de viscosidad se van a utilizar para el diseño de un enfriador sumergido o el diseño de la sección de calentamiento de un esterilizador.

También es muy importante que la temperatura se mantenga constante durante el tiempo de realización de las medidas, y que sea correctamente medida. Un cambio de temperatura de 3°C puede causar un cambio de viscosidad de hasta el 10%.

Para incrementar la precisión en la evaluación de los datos, se deben de realizar las medidas con el mayor número posible de diferentes temperaturas y gradientes de velocidad.

Además, se deben considerar los efectos del calentamiento. En una sustancia que contiene almidón que se hincha en caliente, por ejemplo, las viscosidades serán significativamente diferentes antes y después del calentamiento.

También, se deben de tener en cuenta los factores tiempo y condiciones de almacenamiento. Las propiedades reológicas de muchos productos cambian con el tiempo, y si el propósito de la medida de viscosidad es obtener datos para el diseño del proceso, las medidas se deben de hacer preferentemente en muestras tan recientemente procesadas como sea posible en la etapa del proceso que se esté considerando.



G' = *módulo elástico*
G'' = *módulo viscoso*
δ = *ángulo fase*
η' = viscosidad dinámica

Fig. 3.10 *Ejemplos de resultados obtenidos en análisis reológicos.*

Cálculos de pérdida de carga

A continuación se dan las ecuaciones más usuales para el cálculo manual de las pérdidas de carga y de los gradientes de velocidad para flujo laminar en conductos de sección circular y rectangular. Todas las ecuaciones se basan en la expre-

Los parámetros son:

Q	= caudal	m^3/s
r	= radio	m
Δp	= pérdida de carga	Pa
L	= longitud de tubo	m
$\dot{\gamma}_w$	= gradiente de velocidad en la pared	S^{-1}
n	= índice de comportamiento al flujo	
K	= coeficiente de consistencia	$Pa.s^n$

sión de la ley de la potencia que se ha presentado anteriormente en este mismo capítulo, ya que la mayoría de los alimentos en condiciones de proceso pueden ser descritos mediante esta expresión.

Las ecuaciones son aplicables tanto a fluidos Newtonianos como no-Newtonianos dependiendo del valor de n que se utilice en los cálculos: se tiene que $n < 1$ para los fluidos pseudoplásticos, $n = 1$ en fluidos Newtonianos, y $n > 1$ en fluidos dilatantes.

Conductos de sección circular

La relación entre el caudal volumétrico y la pérdida de carga y entre el caudal volumétrico y el gradiente de velocidad en un conducto de sección circular se describe como sigue:

$$Q = \left(\frac{n}{3 \cdot n + 1}\right) \pi \cdot r^3 \cdot \left(\frac{r \cdot \Delta p}{2 \cdot L \cdot K}\right)^{1/n}$$

o

$$\Delta p = \left(\frac{3 \cdot n + 1}{n}\right)^n \cdot \left(\frac{Q}{\pi \cdot r^3}\right)^n \cdot \frac{2 \cdot L \cdot K}{r}$$

y

$$\dot{\gamma}_w = \left(\frac{3 \cdot n + 1}{n}\right) \cdot \left(\frac{Q}{\pi \cdot r^3}\right) \cdot$$

Conductos de sección rectangular

Las ecuaciones correspondientes para conductos rectangulares son las que se indican a continuación:

$$Q = \left(\frac{n}{4 \cdot n + 2}\right) w \cdot h^2 \cdot \left(\frac{h \cdot \Delta p}{2 \cdot L \cdot K}\right)^{1/n}$$

$$\Delta p = \left(\frac{4 \cdot n + 2}{n}\right)^n \cdot \left(\frac{Q}{w \cdot h^2}\right)^n \cdot \frac{2 \cdot L \cdot K}{h}$$

$$\dot{\gamma}_w = \left(\frac{2 \cdot n + 1}{n}\right) \cdot \left(\frac{Q}{w \cdot h^2}\right)$$

Los nuevos parámetros son:

w	= anchura del conducto	m
h	= altura del conducto	m

Capítulo 4

Microorganismos

La ciencia de los micoorganismos se denomina microbiología. Actualmente, la microbiología se interesa por el estudio de los pequeños seres vivientes.

Algunos hitos de la historia de la microbiología

A. van Leeuwenhoek, 1632 - 1723, auto-didacta holandés, construyó el microscopio con el que pudo observar las bacterias. Leeuwenhoek fué el "padre de la microscopía".

L. Pasteur, 1822 - 1895, químico francés, inventó el método de tratamiento por calor que actualmente se denomina *pasteurización*.

R. Koch, 1843 - 1910, físico alemán que consiguió el Premio Nobel de medicina, en 1905, descubrió bacterias patógenas (que producen enfermedades) tales

Louis Pasteur, inventor de la pasteurización.

como el bacilo de la tuberculosis y la bacteria del cólera. Además, diseñó métodos ingeniosamente simples que permitió el estudio seguro de estos organismos.

A. Fleming, 1881 - 1955, microbiólogo británico, profesor y Premio Nobel de medicina, en 1945, descubrió la penicilina, que se mostró muy efectiva frente a muchas bacterias pero no contra la tuberculosis.

S. Waksman, 1888 - 1973, micólogo americano, microbiólogo y Premio Nobel de medicina, en 1952, descubrió la estreptomicina, que es efectiva contra muchas bacterias incluyendo la tuberculosis.

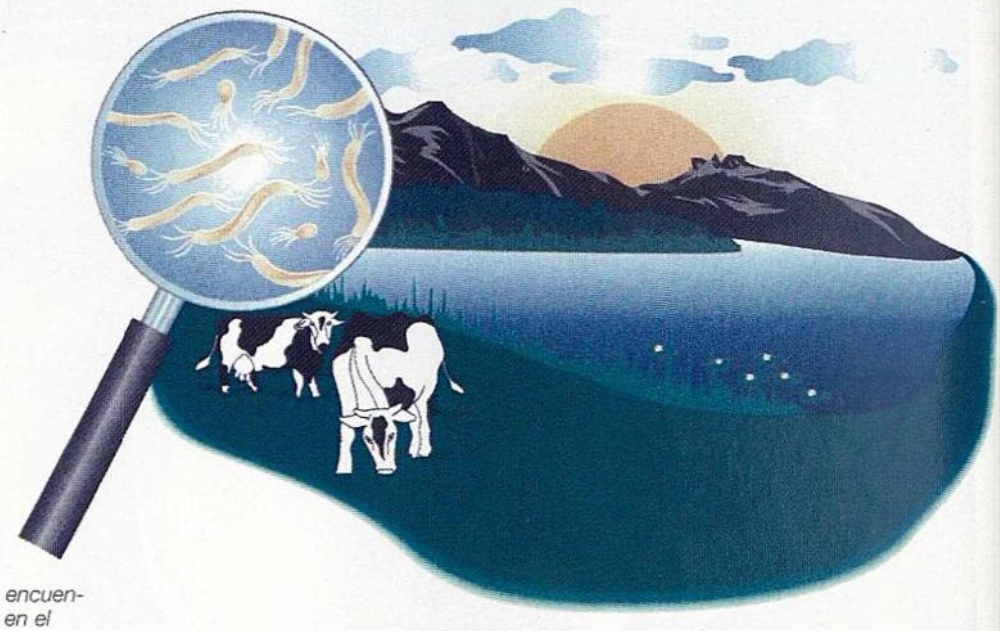


Fig. 4.1 *Los micro-organismos se encuentran en todas partes... en el aire... en el suelo... en el agua.*

Clasificación de los microorganismos

La mayoría de los seres vivos pertenecen a dos reinos, el reino animal y el reino vegetal, pero los microorganismos no se ajustan a ninguno de estos dos reinos. Los microorganismos se clasifican junto a las algas, protozoos y virus en un tercer reino llamado "Protista".

El estudio de la microbiología abarca varios tipos de microorganismos. El estudio específico de las bacterias lo desempeña la bacteriología, mientras que el estudio de los hongos se realiza dentro de la micología y los virus los estudia la virología.

Los microorganismos se encuentran en todas partes -en la atmósfera, el agua, sobre las plantas, animales, y en el suelo. Los microorganismos actúan en la descomposición de la materia orgánica, por lo que juegan un papel muy importante en el ciclo de la naturaleza.

Algunos microorganismos, como las bacterias y los hongos se utilizan en muchos procesos de elaboración de alimentos, como en la fabricación del queso, el yogur, la cerveza y el vino, y en la producción de ácidos que se utilizarán como conservantes de alimentos.

Biotecnología

El concepto de "*biotecnología*", una palabra acuñada recientemente, se corresponde con un conjunto de técnicas que utilizan procesos biológicos. Sin embargo, la biotecnología tiene una historia que precede en miles de años a las modernas disciplinas científicas de la microbiología, bioquímica y tecnología de proceso.

Hasta el final del siglo XIX, estos procesos estaban asociados a los alimentos, sobre todo con la conservación de alimentos.

Los procesos microbiológicos aún juegan un papel importante en la industria alimentaria, pero la biotecnología actualmente está asociada con la utilización industrial de las propiedades de las células vivas o componentes de las células para

conseguir obtener diferentes productos, como medicamentos, hormonas y ciertas vacunas. Para conseguir ésto es necesario utilizar el conocimiento de las ciencias biológicas -bioquímica, microbiología, biología celular, biología molecular e inmunología- así como todas las técnicas de diseño de equipos, ingeniería de procesos, técnicas de separación, métodos analíticos, etc.

Este capítulo trata principalmente los microorganismos de interés en la leche y el procesado de la leche, aunque determinados virus, los denominados bacteriófagos, también serán descritos. Estos organismos causan serios problemas en la fabricación de productos donde se necesitan los microorganismos para el desarrollo de sabor, textura y otras características.

Bacterias

Las bacterias son organismos unicelulares que se multiplican principalmente por división binaria, es decir, mediante partición en dos nuevas células. El método más simple de clasificar las bacterias es según su apariencia. Pero para poder ver las bacterias, primero se han de teñir para a continuación ser estudiadas al microscópio con un aumento de 1.000 X.

El sistema que en la actualidad se utiliza de forma general para la coloración de bacterias fue introducido por el bacteriólogo danés Gram y a dicho método se le conoce como tinción de Gram. Las bacterias se dividen en dos grupos principales según sus características de coloración Gram: Gram negativas (rojas) y Gram positivas (azules).

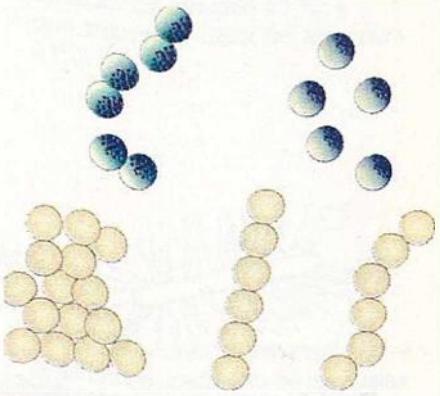


Fig. 4.2 *Las bacterias esféricas (cocos) se presentan según diferentes formaciones.*

Morfología de las bacterias

En la palabra morfología *morfo* significa forma y *logía* significa el estudio de. Por lo tanto morfología significa estudio de la forma de las bacterias. Las características morfológicas incluyen: forma, tamaño, estructura celular, movilidad (capacidad de moverse en un líquido), y formación de esporas y cápsulas.

Forma de las bacterias

Se pueden distinguir tres formas características en bacterias: esféricas, en forma de bastoncitos y espirales. La posición relativa de las bacterias entre sí es otra característica distintiva de importancia.

La Figura 4.2 muestra cómo las bacterias esféricas (cocos) se agrupan en diferentes formaciones. Los diplococos se agrupan en pares. Los estafilococos forman racimos (del griego *stafilon*, que significa racimo de uvas), mientras que los estreptococos forman cadenas (del griego *streptos* que significa cadena).

La Figura 4.3 muestra bacterias con forma de bastoncitos y espirales. Las bacterias con forma de bastoncitos (bacilos) varían tanto en longitud como en espesor. También forman cadenas. Las bacterias espirales (spirillum) pueden también variar en longitud y espesor, así como en el número de vueltas.

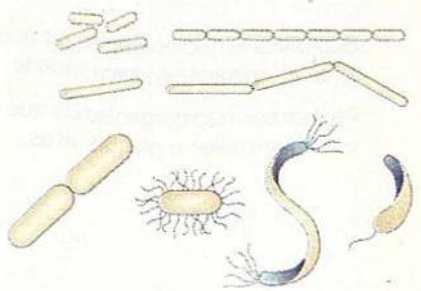


Fig. 4.3 *Bacterias en forma de espiral y bastoncito (bacilos).*

Tamaño de las bacterias

Los cocos tienen un tamaño que varía entre 0.4 y 1.5 μm (1 μm = 0.001 mm). La longitud de los bacilos puede variar entre 2 y 10 μm, aunque algunas especies pueden ser mayores o menores.

Estructura celular de las bacterias

Como todas las células, la célula bacteriana que se muestra en la Figura 4.4 contiene un semilíquido, una sustancia rica en proteinas denominada citoplasma. El citoplasma también contiene los ribosomas, donde tiene lugar la síntesis de las proteinas, y las enzimas que toman parte en el metabolismo de la célula. El material de reserva, como la grasa y el glucógeno, se puede encontrar también en el citoplasma.

Cada célula tiene un material nuclear (ADN = ácido desoxiribonucléico) que contiene la información genética que controla su vida y reproducción. En las células de los animales y plantas superiores el núcleo, contrariamente a lo que ocurre en las bacterias, está rodeado por una membrana. El núcleo y la sustancia básica de la célula constituyen el protoplasma.

El citoplasma está rodeado por una membrana citoplásmica, semipermeable, que lleva a cabo muchas funciones vitales, entre las que se incluyen la regulación del intercambio de sales, nutrientes y productos metabólicos entre la célula y su

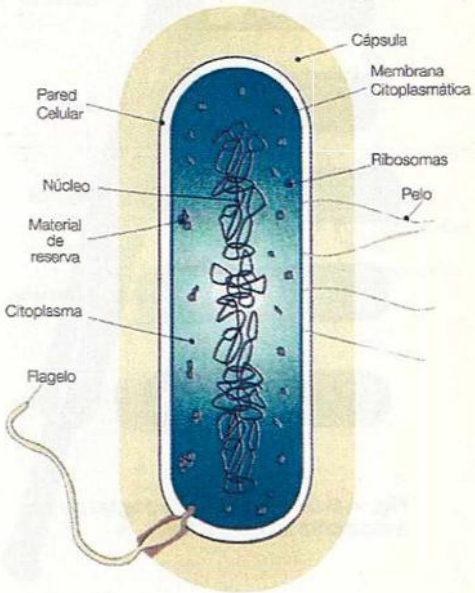


Fig. 4.4 *Dibujo esquemático de una célula bacteriana.*

entorno. La membrana citoplásmica está, a su vez, encerrada dentro de otra capa, que es la pared celular. Esta le sirve como esqueleto a la bacteria, dándole su forma definida. Esta pared celular está también rodeada de una mucosa (viscosa) más o menos fuertemente desarrollada. Si es extragruesa, se denomina cápsula.

La composición de la mucosa es complicada. Consta de polisacáridos complejos que contienen grupos acetilo y amino, o de polipéptidos o proteinas.

Los flagelos son estructuras que sirven para agarrarse a las superficies (bacterias, epitelio intestinal, dispositivos de proceso, etc.)

Algunas bacterias tienen la capacidad de formar esporas (ver el apartado "Formación de esporas y formación de cápsulas").

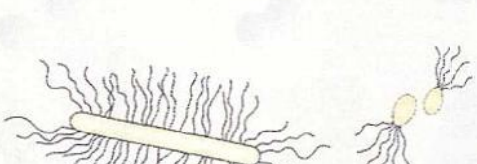


Fig. 4.5 *Los flagelos se pueden distribuir a todo alrededor de la bacteria, o localizarse en uno o ambos extremos.*

Movilidad de las bacterias

Muchos bacilos y algunos cocos son capaces de moverse en un medio nutritivo líquido. Se impulsan con la ayuda de flagelos, que son como largos pelos o apéndices que crecen desde la membrana citoplasmática (ver Figura 4.5). La longitud y número de flagelos varía de un tipo a otro de bacterias. Las bacterias generalmente se mueven a una velocidad de 1 a 10 veces su propia longitud por segundo. La bacteria del cólera es quizá una de las más rápidas, pudiendo desplazarse a velocidades de 30 veces su longitud por segundo.

Formación de esporas y formación de cápsulas

La espora es una forma de protección contra condiciones adversas, como por ejemplo: calor y frío, presencia de desinfectantes, falta de humedad, o falta de nutrientes. Algunos de los distintos tipos de formaciones de esporas se ilustran en la Figura 4.6.

Sólo unos pocos tipos o géneros de bacterias forman esporas: *Bacillus* y *Clostridium* son los mejor conocidos. Bajo condiciones adversas estos organismos pueden reunir material nuclear y algunas reservas alimenticias en una zona de la célula y formar una cubierta dura que protege el material nuclear.

Cuando la célula madre forma una espora puede conservar su forma original, o puede hincharse en el centro o en uno de sus extremos, dependiendo de donde esté localizada la endospora. Durante la formación de la espora, la parte vegetativa de la célula bacteriana muere. Finalmente, la célula se disuelve y la espora queda libre.

La espora germina y se convierte en una célula vegetativa y comienza a reproducirse cuando las condiciones del medio son de nuevo favorables.

Las esporas no tienen metabolismo. Pueden sobrevivir durante años en ambiente seco y son más resistentes que las bacterias a los esterilizantes químicos, antibióticos, falta de humedad y a la luz ultravioleta. Son también resistentes al calor, ya que se necesitan 20 minutos a 120ºC para matarlas con una seguridad del 100%. Sin embargo, las bacterias formadoras de esporas, cuando se encuentran ya en su estado vegetativo, mueren como el resto de las bacterias, bastando unos pocos minutos a 100 ºC.

Algunos tipos de cocos y bacilos segregan una capa pegajosa en la que se cierran y a la que se le llama cápsula. Este tipo de protección no es tan resistente como la que proporcionan las esporas, pero ayuda a soportar condiciones de falta de humedad. La propagación "por accidente" o "a propósito" de tales organismos en la leche hace que se vuelva viscosa y pegajosa. En ambos casos este fenómeno provoca el "ahilado" de la leche.

Saprófitos = microorganismos que viven en materia orgánica muerta.

Parásitos = microorganismos que viven en animales o plantas vivas.

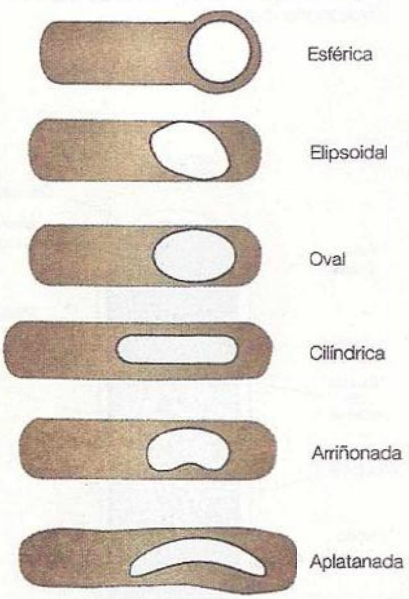


Fig. 4.6 *Distintos tipos de formas de las endosporas en las bacterias.*

Condiciones para el crecimiento de las bacterias

Nutrientes

Las bacterias necesitan ciertos nutrientes para su desarrollo. Estas necesidades dependen mucho del tipo de bacteria. Las principales fuentes de alimentación son los compuestos orgánicos tales como las proteinas, grasas e hidratos de carbono. Además, se necesitan pequeñas cantidades de elementos traza y vitaminas para el crecimiento y buen estado de las bacterias.

A los microorganismos que viven sobre sustancias orgánicas muertas se les llama *saprofitos*. A los que viven en sustancias orgánicas vivas (tejidos animales o vegetales) se les llama *parásitos*.

Además del material para la formación de la célula, la materia orgánica proporciona también la energía necesaria. Dicha materia debe ser soluble en agua y tener un bajo peso molecular, es decir, debe ser descompuesta en muy pequeñas moléculas con objeto de que éstas puedan pasar por la membrana citoplasmática y ser digeridas por la bacteria. Por lo tanto, la bacteria tiene que tener acceso al agua.

En este punto es necesario introducir el término "actividad de agua", a_w, que se define como la relación entre la presión de vapor de agua en el producto y la presión de vapor del agua pura a la misma temperatura.

Cuando la presión de vapor en el alimento es la misma que la presión de vapor de la atmósfera, se alcanza el equilibrio. La presión de vapor se corresponde con los diferentes contenidos de agua en diferentes alimentos, dependiendo de la cantidad de agua libre y ligada.

Las bacterias no pueden normalmente desarrollarse a $a_w < 0.9$. Para las levaduras y los mohos la a_w debe ser < 0.88 y < 0.8, respectivamente para que se detenga su crecimiento. Sin embargo, a bajos valores de a_w no se detiene la actividad enzimática.

En la producción de leche en polvo se ajusta su máximo contenido de humedad según la calidad para que pueda ser almacenada durante largos periodos de tiempo sin que se deteriore. Esto significa que la a_w debe ser < 0.8 (normalmente inferior a 0.2 - 0.3).

Los microorganismos se alimentan por secreción de enzimas en los alimentos de su entorno. Dichas enzimas descomponen sustancias insolubles de estructura compleja en sustancias solubles simples que pueden pasar a través de la pared celular. El número y los tipos de enzimas que tiene un organismo determina el tipo de compuestos alimenticios que dicho organismo puede descomponer y hasta qué punto.

Algunos microorganismos carecen de la capacidad de segregar enzimas para romper las sustancias que existen fuera de su estructura celular. Tienen que actuar sobre productos de descomposición procedentes de otros microorganismos. A una relación de este tipo se le llama *simbiosis*, si ambas partes se benefician de ella. Cuando un organismo produce sustancias que tienen un efecto inhibidor en otros organismos, a esta relación se le llama antibiosis.

La a_w se puede calcular mediante la fórmula $a_w = p/p_0$ donde p = presión de vapor del alimento a t °C, y p_0 = presión de vapor del agua pura a t°C.

Simbiosis = Unión permanente entre organismos, cada uno de los cuales depende de la existencia del otro.

Antisimbíosis = Coexistencia donde un organismo produce sustancias que inhiben el crecimiento de otro organismo.

Paso de materia a través de la membrana citoplasmática

Una célula bacteriana puede mantener un medio interior relativamente constante, en condiciones externas variables, ajustando el equilibrio entre el agua, las sustancias inorgánicas y las sustancias orgánicas. Muchos iones y sustancias orgánicas se encuentran presentes en diferentes concentraciones en el interior de la célula y en el medio ambiente. La célula necesita un suministro constante de nutrientes orgánicos e inorgánicos desde el exterior para mantener sus procesos vitales. También tiene que eliminar los productos resultantes de su metabolismo. Por lo tanto, se desarrolla un constante intercambio de materia entre la célula y el medio ambiente.

Ese intercambio tiene lugar a través de la membrana citoplasmática, que es semipermeable, por lo que no deja pasar a todas las sustancias con la misma facilidad. Por ejemplo, un disolvente pasa más fácilmente a través de ella que la sustancia disuelta en el mismo.

La membrana tiene también una permeabilidad selectiva, actuando como una barrera en ambas direcciones para ciertas sustancias.

El paso a través de una membrana citoplasmática puede ser activo o pasivo. La propia célula debe suministrar energía para que se produzca el paso de ciertas sustancias. Por otra parte, en los procesos pasivos, las fuerzas necesarias son suministradas por el entorno de la célula. Las fuerzas *osmóticas* son importantes en este contexto. En procesos activos, es la energía metabólica de la célula la que suministra la energía necesaria para el paso de la materia.

Temperatura

La temperatura es el factor que afecta de forma más importante al crecimiento y reproducción de los microorganismos, y por lo tanto también es el factor más importante en la descomposición de los alimentos. Las bacterias sólo se pueden desarrollar dentro de ciertos límites de temperatura, que pueden variar de unas especies a otras. En principio, las bacterias pueden desarrollarse a temperaturas comprendidas entre el punto de congelación del agua y la temperatura a la cual coagula la proteina del protoplasma. En algún punto entre las temperaturas máximas y

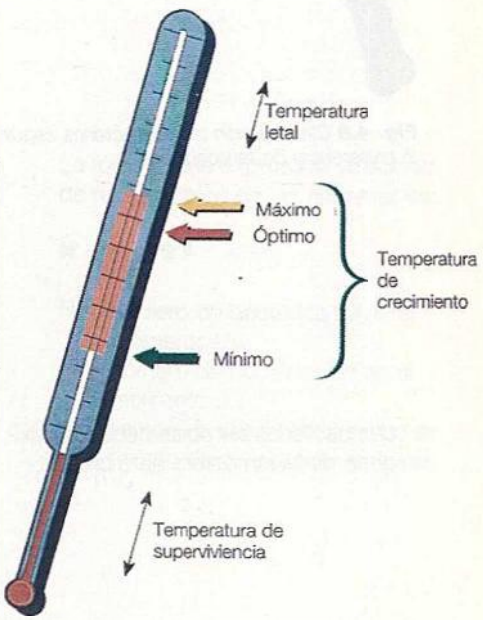


Fig. 4.7 *Condiciones de temperatura para el crecimiento bacteriano.*

mínimas, es decir, entre los límites superior e inferior de viabilidad de las bacterias, se encuentra la temperatura óptima de desarrollo de estos microorganismos. Esta es la temperatura a la cual las cepas de bacterias se propagan más vigorosamente.

Las temperaturas por debajo del mínimo hacen que el crecimiento se detenga, pero no matan a las bacterias. Estas pueden sobrevivir durante 10 horas a temperaturas por debajo de -250°C. Sin embargo, las bacterias pueden ser dañadas por procesos repetidos de congelación y descongelación. Las funciones vitales de las bacterias se detienen casi completamente a temperaturas cercanas al punto de congelación del agua, ya que las células tienen un alto contenido de agua que se congelaría. Cuando ocurre esto, la bacteria no puede absorber nutrientes a través de sus paredes celulares.

Si la temperatura se sube por encima del máximo, las bacterias mueren rápidamente por calor. Muchas bacterias mueren a los pocos segundos de ser expuestas a una temperatura de 70°C, pero otras sobreviven a 85°C durante 15 minutos, aunque no sean capaces de formar esporas.

Se necesita mucho más calor para matar esporas de bacterias, siendo el calor seco menos efectivo que el calor húmedo. El tratamiento con vapor a 120°C durante 30 minutos asegura la destrucción de todas las esporas, pero si se trata de un calor seco, las bacterias deben permanecer a 160°C durante 2 horas para garantizar un 100 % de destrucción de esporas.

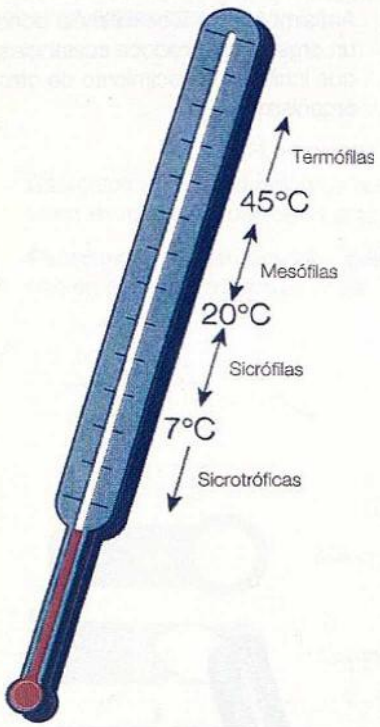


Fig. 4.8 *Clasificación de las bacterias según la preferencia de temperatura.*

Clasificación por temperaturas óptimas

Las bacterias pueden dividirse en las siguientes categorías, según su rango de temperaturas óptimas:

Bacterias sicrótrofas (tolerantes al frío), de cepas sicrofílicas o mesofílicas, son aquellas capaces de reproducirse a temperaturas de 7°C o incluso menores, independientemente de su temperatura óptima.

Bacterias sicrófilas (amantes del frio), que son aquellas cuya temperatura óptima de crecimiento está por debajo de los 20°C.

Bacterias mesófilas (amantes de temperaturas medias), que son aquellas que sus temperaturas óptimas de crecimiento se encuentran comprendidas entre 20 y 44°C.

Bacterias termófilas (amantes del calor), que tienen sus temperaturas óptimas de crecimiento entre 45 y 60°C.

Bacterias termodúricas (resistentes al calor), que son aquellas que aguantan temperaturas por encima de 70°C. No crecen ni se reproducen a altas temperaturas, pero pueden resistirlas sin morir.

Las bacterias sicrótrofas son de interés particular para la industria láctea, porque la actividad microbiológica de la leche fresca y de la leche pasteurizada tiene lugar a temperaturas de 7°C o inferiores.

Humedad

Las bacterias no pueden crecer en ausencia de humedad. Como se ha indicado al principio, el crecimiento se inhibe a $a_w < 0.9$.

Muchas bacterias mueren rápidamente por desecación, mientras que otras toleran periodos de sequedad de varios meses. Las esporas bacterianas pueden sobrevivir en períodos secos durante años. Debido a que los microorganismos necesitan agua en una forma asimilable, es posible controlar su desarrollo teniendo en cuenta este hecho. Por ejemplo, mediante el secado se elimina el agua y se detiene el crecimiento de las bacterias. Cuando la humedad disponible es del 20% el crecimiento de los organismos es muy bueno. Cuando se reduce al 10%, el crecimiento es limitado, y si el contenido de agua disponible es inferior al 5% se detiene el crecimiento (con la excepción de los mohos).

Las bacterias aerobias necesitan oxígeno de la atmósfera para crecer.

Oxígeno

Muchos microorganismos necesitan oxígeno libre para oxidar sus alimentos con objeto de producir energía y mantener sus procesos vitales. Mediante la oxidación completa de los compuestos orgánicos se forman agua y CO_2. Muchos microorganismos obtienen el oxígeno del aire y se les llama por ello microorganismos *aerobios*. Otros tipos de microorganismos obtienen la energía de los alimentos sin necesidad de oxígeno libre, y se les llama microorganismos *anaeróbios*.

Hay algunas bacterias que consumen oxígeno libre si se encuentra disponible, pero pueden también crecer en ausencia de dicho oxígeno libre. A estas bacterias se les llama anaerobias *facultativas*. Las bacterias anaerobias y anaerobias faculta-

tivas normalmente obtienen su energía por medio de la fermentación de los compuestos orgánicos. Químicamente, esto es una oxidación incompleta, ya que se producen productos orgánicos de desecho, como por ejemplo ácido láctico a partir de la lactosa.

Como la mayor parte de los organismos obtienen su oxigeno del aire, es decir, que son aeróbios, la eliminación del oxígeno/aire es un medio de controlar o evitar su crecimiento. Ejemplos de esto los tenemos en los sistemas de envasado a vacío o con gases inertes, y en la utilización de materiales que actúan como una barrera contra el aire.

Las bacterias anaerobias mueren si son expuestas al oxígeno atmosférico durante cierto tiempo.

La luz

La luz no es esencial para la mayoría de las bacterias, ya que éstas no tienen clorofila ni sintetizan sus alimentos de la misma forma que las plantas. Por el contrario, la luz puede provocar la muerte de las bacterias, si contiene rayos ultravioleta, ya que producen cambios químicos en el DNA y en las proteinas celulares.

Muchos organismos mueren cuando son expuestos a la luz directa del sol. Los rayos ultravioleta se utilizan con frecuencia en la esterilización de la atmósfera de las cámaras de cultivos. No se utilizan, sin embargo, para la esterilización de alimentos, ya que podrían tener lugar cambios químicos en los mismos.

Presión osmótica

Las bacterias no pueden soportar soluciones con altas concentraciones de azúcar o sal, o altas presiones osmóticas. Cuando se les expone a la acción de este tipo de soluciones, el agua sale de la célula, provocando su deshidratación. La presión osmótica se utiliza como un medio de conservación de los alimentos, como por ejemplo en la conservación de fruta (mermeladas), pescados salados y leche azucarada condensada.

pH-acidez/alcalinidad

Los microorganismos no pueden soportar soluciones ácidas o alcalinas fuertes. Las bacterias prefieren un pH cercano a la neutralidad, es decir, 6.8-7.4. Los mohos prefieren un pH de 4.5 o inferior.

La leche fresca tiene un pH de 6.5-6.7 y la leche acidificada un pH de 4.6 o inferior.

Reproducción de las bacterias

Las bacterias normalmente se reproducen de forma asexual, por división, como se ve en la Figura 4.9. Primero aumenta el tamaño de la célula. A continuación, el material nuclear se reúne en una parte de la célula, y ésta se divide en dos porciones idénticas. Estas partes se separan y la pared celular se dobla y crece hacia dentro. Cuando las paredes se tocan, se funden, resultando dos organismos que pueden permanecer juntos o separarse, dando lugar a unas disposiciones distintas pero características.

El tipo de formación es en general relativamente constante para las distintas especies de bacterias. Por ello, esta característica se utiliza para la designación de las diferentes especies.

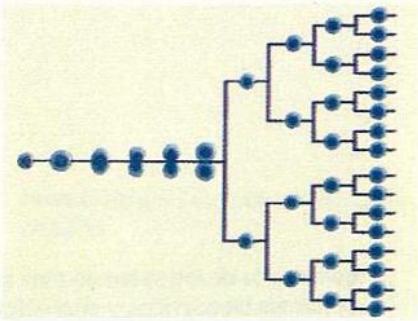


Fig. 4.9 *Las bacterias normalmente se reproducen asexualmente por fisión.*

Velocidad de reproducción

En condiciones favorables la división de las bacterias puede tener lugar a intervalos de 20-30 minutos. La velocidad de reproducción se puede calcular con la fórmula que se muestra a la derecha de esta página. Con un tiempo de generación de 0.5 horas a una temperatura óptima, una bacteria/ml de leche pasar a ser un millón de bacterias/ml en 10 horas. Bajo condiciones óptimas, se pueden formar en los alimentos 100-1000 millones de bacterias/ml. En esta etapa la velocidad de crecimiento se inhibirá por falta de nutrientes y por la acumulación de residuos metabólicos tóxicos en el medio. La reproducción finalmente se detiene, muriendo una gran cantidad de bacterias. En realidad, unas condiciones desfavorables, como una temperatura de almacenamiento baja o un bajo pH, limitará o retrasará el crecimiento de las bacterias en un alimento.

La fórmula que expresa la velocidad de reproducción de las bacterias es:

$$N = N_0 \times 2^{\frac{t}{g}}$$

N = número de bacterias/ml en el momento t
N_0 = número de bacterias/ml en el momento 0
t = tiempo de crecimiento en horas
g = tiempo de generación en horas

Curva de crecimiento de las bacterias

La Figura 4.10 muestra una curva de crecimiento de bacterias transferidas a un sustrato por inoculación. Normalmente, hay un retraso antes de que las bacterias

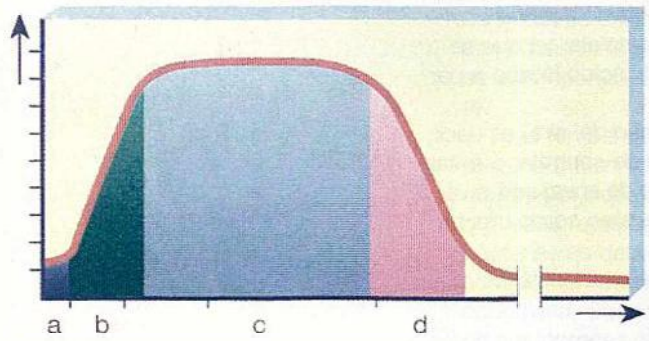


Fig. 4.10 *Curva de crecimiento de las bacterias.*
a Fase de incubación
b Fase logarítmica
c Fase estacionaria
d Fase de mortalidad

comiencen la reproducción, ya que primero tienen que aclimatarse a su nuevo ambiente. Esta etapa del desarrollo (a) se llama fase de *incubación*. La existencia de la fase de incubación puede ser también debida a que el cultivo ha estado aletargado. Por ejemplo, puede haber estado almacenado a bajas temperaturas antes de la inoculación.

La duración del período de incubacion varía según el grado de inhibición de las bacterias en el momento de la inoculación. Si se utilizan bacterias viables y en crecimiento no hay período de incubación, comenzando la reproducción de forma inmediata.

Después de la fase de incubación, las bacterias comienzan a reproducirse rápidamente durante las primeras pocas horas. Esta fase (b) se llama fase de crecimiento logarítmico *(fase log)*, ya que la reproducción tiene lugar a ese ritmo.

Al mismo tiempo, se acumulan en el cultivo productos metabólicos de desecho tóxicos. Debido a ello, la velocidad de reproducción se verá frenada, mientras que al mismo tiempo se produce la muerte constante de bacterias, de forma que se alcanza un estado de equilibrio entre la muerte de viejas células y la formación de otras nuevas. Esta etapa (c) es conocida como *fase estacionaria*.

En la fase siguiente (d) cesa completamente la formación de nuevas células y las ya existentes comienzan a morir de forma gradual. Finalmente, el cultivo se extingue. Esta es la *fase de mortalidad*.

La forma de la curva, es decir, su longitud en las distintas fases y el gradiente de la curva en cada fase varían con la temperatura, alimentos disponibles y otros parámetros de crecimiento.

La mayoría de los sistemas más importantes bioquímicos y enzimáticos de los productos lácteos son los resposables de los siguientes efectos:

- Desdoblamiento de los carbohidratos.
- Desdoblamiento de las proteínas
- Desdoblamiento de las grasas
- Desdoblamiento de la lecitina
- Producción de color
- Producción de mucílagos y viscosidades
- Producción de olores
- Reducción del oxígeno
- Enfermedades

El desdoblamiento de los carbohidratos tiene lugar por:

- hidrólisis
- fermentación alcohólica
- fermentación ácido-láctica
- fermentación de tipo coliforme
- fermentación ácido-butírica

Actividad bioquímica

Por medio de la actividad bioquímica se producen los distintos tipos de deterioro de los alimentos o las enfermedades en animales y plantas que los microorganismos pueden causar. La actividad bioquímica de los microorganismos decide cómo pueden ser éstos utilizados en los procesos de fabricación de alimentos tales como la fabricación de queso, yogur, mantequilla, etc.

La actividad de los microorganismos está gobernada por los enzimas que poseen, ya que éstos determinan el tipo de alimentación que pueden tener, los productos que pueden desdoblar y, por lo tanto, los productos finales que pueden ocasionar.

Hay muchos sistemas bioquímicos y enzimáticos en microbiología. Los siguientes son los más importantes por su relación con la leche y los productos lácteos. Estos sistemas se subdividen según los constituyentes que pueden desdoblar y sus efectos.

Descomposición de los hidratos de carbono

Los carbohidratos contienen los elementos carbono, hidrógeno y oxígeno en largas cadenas. Incluyen estas sustancias a la celulosa, el almidón, los polisacáridos y los azúcares. La descomposición se desarrolla en etapas, con la adición de una molécula de agua en cada una de ellas. Las enzimas presentes en los microorganismos determinan qué hidratos de carbono se pueden descomponer y con qué intensidad. En la leche la hidrólisis del disacárido lactosa da lugar a los monosacáridos que lo componen, glucosa y galactosa, que pueden ser completamente degradados hasta CO_2 y agua (metabolismo oxidativo) aunque normalmente sufren la fermentación.

La *fermentación* da como resultado varios productos tales como ácidos orgánicos (láctico, butírico, etc.), alcoholes (etílico, butírico, etc.) y gases (hidrógeno, anhidrido carbónico, metano, etc.).

Las formas más importantes de fermentación en la leche son:

- Fermentación *alcohólica* de la lactosa con formación de alcohol y gas. Por ejemplo, la lactosa es descompuesta en alcohol etílico y anhidrido carbónico. La fermentación alcohólica tiene normalmente lugar bajo condiciones anaeróbias y es llevada a cabo principalmente por levaduras y mohos.
- Fermentación *ácida* de la lactosa con formación de ácido láctico. Esta reacción se utiliza para la fabricación de queso, yogur y otros productos acidificados.

• Fermentación *coliforme* (ácido y butanodiol mezclados) de la lactosa, de la que resultan una gran variedad de productos finales, tales como ácido láctico, ácido acético, ácido succínico, ácido fórmico, butanodiol, alcohol etílico, dióxido de carbono e hidrógeno.

• Fermentación del *ácido butírico* bajo estrictas condiciones anaeróbias por bacterias *Clostridium*. En la fermentación butírica, la lactosa se descompone en ácido butírico, anhidrido carbónico, hidrógeno y, en algunos casos, alcohol butírico.

Como regla general, en la fermentación de los carbohidratos de la leche se producen ácidos (cortado o agriado de la leche) y algunas veces gas (dependiendo del tipo de organismos).

Descomposición de las proteínas

El proceso por el cual las proteinas son descompuestas se llama *proteolisis*, donde *proteo* significa proteína, y lisis, rotura o descomposición. Las enzimas más importantes que llevan a cabo esta labor son las *proteasas*, entre las que tenemos la renina, la pepsina y la tripsina. Estas enzimas degradan las proteinas a péptidos, que son degradados a su vez por varias peptidasas hasta peptidos más pequeños y aminoácidos. Los aminoácidos pueden ser reutilizados para la síntesis de proteinas por la célula. Sin embargo, pueden también ser degradados oxidativamente o mediante la fermentación.

Las proteínas y sus aminoácidos constituyentes presentan una combinación muy amplia de elementos químicos, entre los que se encuentran el carbono, hidrógeno, oxígeno, azufre, nitrógeno y fósforo. La rotura o desdoblamiento de las proteínas da lugar, por lo tanto, a un gran número de ácidos, alcoholes, gases (hidrógeno, anhidrido carbónico, metano, sulfuro de hidrógeno y amoniaco), así como otros compuestos. La descomposición de las proteínas casi siempre da como resultado la formación de amoníaco, que es alcalino y tiene un fuerte olor.

Proteolisis = Desdoblamiento de la proteína

Tres aminoácidos, la cistina, cisteína y metionina, contienen azufre, que se descompone formando sulfuro de hidrógeno, que también produce un fuerte olor.

La descomposición de las proteinas en la leche liquida tiene lugar en dos etapas principales llamadas peptonización y que son:

• Cuajado (dulce en contraposición a la ácida) o coagulación de la leche por enzimas de tipo renina. Este defecto de la leche se denomina cuajado dulce, que se presenta de vez en cuando en la pasteurización de la leche que ha sido almacenada caliente.

• Proteolisis de las proteínas, con producción de amoníaco, que es alcalino.

El grado de aminoácidos libres y de amoníaco presente en el queso da una indicación de su edad y maduración, como consecuencia del progreso de la proteolisis. Los quesos azules o madurados con mohos sufren una rápida proteolisis, que da lugar a la producción de grandes cantidades de amoníaco.

Descomposición de la grasa

El proceso por el cual la grasa es rota o descompuesta por enzimas se conoce con el nombre de *lipolisis*, que viene de las palabras latinas *lipo*, que significa grasa, y *lisis*, que quiere decir rotura o descomposición. La enzima más importante relacionada con este proceso es la lipasa. Durante la lipolisis, la grasa se hidroliza dando glicerol y tres ácidos grasos separados. Algunos de estos ácidos grasos son volátiles y dan lugar a olores fuertes. Un ejemplo es el ácido butírico, que da lugar al característico olor a rancio.

Lipolisis = Desdoblamiento de la grasa

La grasa pura es relativamente resistente a la descomposición microbiológica. La grasa de la leche, en la forma de mantequilla y nata, contiene proteínas, hidratos de carbono, sales minerales, etc., para el crecimiento bacteriano, por lo cual es más susceptible.

Muchas bacterias y mohos que descomponen las proteínas descomponen también las grasas.

Descomposición de la lecitina

La lecitina, que constituye la capa fosfolipídica que se encuentra alrededor de los glóbulos de grasa, es una combinación química de glicerol, dos ácidos grasos, ácido fosfórico, y colina, que es un alcali orgánico. Las cepas de Bacillus cereus producen enzimas, lecitinasas, que hidroliza la lecitina en diglicérido y fosforil colina. Las membranas de los glóbulos se dividen, dando lugar a una emulsión grasa inestable que a menudo se presenta en la forma de copos o grumos que flotan

sobre la superficie de la leche o crema. Este defecto de la leche o de la nata se denomina "crema cortada".

La posterior descomposición de la colina en trimetil amina dará lugar a un olor y sabor a pescado.

Cromogénesis = Producción de color causada por bacterias cromogénicas.

Producción de color y pigmentos

El proceso de producción de color se llama cromogénesis, y al organismo que produce color se le conoce como cromogénico, que viene de las palabras latinas *cromo*, que significa color, y *génico*, que significa generación o producción.

Este proceso metabólico es una característica de ciertos microorganismos. Es más importante en algunos alimentos que en otros, y tiene lugar a temperaturas más bajas. También son necesarias condiciones aeróbias para que tenga lugar la cromogénesis.

Existen dos tipos de pigmentos:

- endo-pigmento, que permanece en la célula;
- exo-pigmento, que se difunde fuera de la célula en los alimentos que la rodean.

Hay tres grupos básicos de colorantes:

- Carotenoides, que son amarillos, verdes, cremas o dorados.
- Antocianos, que son rojos.
- Melaninas, que son marrones o negras.

El nombre de un organismo indica en ocasiones el colorante que produce. Como ejemplo se tiene al *Staphylococcus aureus* = "el Staphylococcus dorado"

Producción de mucílagos

Cierto número de bacterias producen usualmente mucílagos o viscosidades, lo que es utilizado en ciertos productos fermentados tales como yogur y längfil (leche ahilada sueca).

Las especies de un organismo a menudo se denominan según el color que producen, por ejemplo:

Albus	=	blanco
Luteus	=	amarillo
Citreus	=	amarillo limón
Roseus	=	rosa o rojo
Aureus	=	dorado
Violkaceum	=	violeta
Nigra	=	negro o marrón

Produccion de olores

Un cierto número de microorganismos produce olores fuertes. Así se tienen:

- *Mohos*, que producen olor mohoso,
- *Actinomices*, que producen un olor terroso,
- *Levaduras*, que producen un olor afrutado;
- *Pseudomonas*, que producen un olor afrutado, o bien a pescado
- *Coliformes*, que producen un olor sucio a vaca;
- *Lactococcus* lactis var. maltigenes, que producen un olor a malta.

Poder reductor

Todos los microorganismos tienen en alguna medida poder reductor, es decir, la capacidad de eliminar oxígeno. En la leche, los reductores más poderosos son los *Lactococcus*, coliformes y *Bacillus*. Estos son responsables en gran medida de la reducción de oxígeno en pruebas tales como de la "resazurina" y "azul de metileno", que indican el grado de contaminación microbiológica y la calidad del producto.

Las **Bacterias Patógenas** causan enfermedades en seres humanos, animales y plantas.

Producción de enfermedades (Toxinas)

Los organismos que producen enfermedades se denominan *patógenos*, que viene de las palabras latinas *pathos*, que quiere decir condición enferma, y *genesis*, que indica producción. Los organismos producen enfermedades en los seres humanos, animales y plantas mediante ataque y rotura de células vivas produciendo sustancias venenosas llamadas toxinas. Es posible matar a estos microorganismos, pero sus toxinas pueden quedar y producir la enfermedad.

Como ejemplos tenemos los *Staphylococcus, Salmonella y Clostridium*, que producen intoxicaciones, y la *Salmonella thyphosa*, causante de las fiebres tifoideas, el *Clostridium letani* (causante del tétanos) y la *Corynebacterium diphtheriae* (causante de la difteria).

Recuento de bacterias

Las bacterias se puede estudiar y diagnosticar si en primer lugar son cultivadas.

Las bacterias se pueden transferir a un medio con suficientes nutrientes adecuados, con una temperatura favorable, concentración de sal, pH, etc. Entonces comenzarán a crecer y reproducirse.

Por conveniencia, las bacterias se cultivan sobre medios sólidos denominados agares, que consisten en una especie de gel, como una sustancia semidura. Los nutrientes requeridos son añadidos al agar y las bacterias se extienden sobre su superficie. Utilizando los nutrientes, las bacterias comienzan a crecer y reproducirse. Cada bacteria individual se multiplica sobre la superficie del agar en un racimo de bacterias, todas descendientes de la primera progenitora. Este racimo, conocido como colonia, contendrá varios millones de bacterias. Las colonias que tienen más de cientos de miles son visibles a simple vista. Mediante diluciones de la muestra original es posible hacer un recuento de bacterias. La apariencia de las colonias varía en función de la cepa de bacteria, el tipo de agar y los tipos de nutrientes utilizados. Mediante el uso de medios de agar selectivos, que permiten crecer sólo a grupos específicos de bacterias, es posible poner de manifiesto la presencia de distintos tipos de bacterias.

Identificación y clasificación de las bacterias

Con el fin de clasificar los distintos tipos de bacterias que existen, fueron previamente divididas en familias, géneros y especies de la misma forma que los animales y plantas superiores.

En zoología y botánica la clasificación se hace según las características externas del individuo (apariencia). El mismo principio fue originalmente aplicado a la clasificación de bacterias, pero pronto se comprobó que no era suficiente agrupar las bacterias simplemente por su tamaño, forma, apariencia y movilidad. Aparte de estas características externas fue necesario considerar su metabolismo (su relación con los distintos hidratos de carbono, proteínas, grasas, etc.) y las características de las cepas. Con la información obtenida sobre estas materias fue posible agrupar a los organismos similares en un sistema bacteriano de taxonomía.

Los nombres en latín de las bacterias según este sistema son actualmente utilizados a nivel internacional.

Cada bacteria tiene dos nombres. El primero representa el género y el segundo la especie, que a menudo hace referencia a cierta propiedad o a su origen. Ver también el anterior apartado sobre pigmentos y producción de color.

La identificación de las bacterias a nivel de género se hace mediante una combinación de tests morfológicos y sobre todo bioquímicos.

El sistema bacteriano abarca:

10	órdenes
47	familias
190	géneros
y unas 1800	especies

Las bacterias en la leche

Cuando la leche es segregada en la ubre es virtualmente estéril. Pero incluso antes de abandonarla es infectada por bacterias que entran a través del canal del pezón. Estas bacterias son normalmente inofensivas y reducidas en número: sólo unas pocas decenas o centenares por mililitro.

Sin embargo, en casos de inflamación bacteriana de la ubre (mamitis), la leche es fuertemente contaminada con bacterias y puede incluso no ser apropiada para su consumo, sin hacer mención del propio sufrimiento de la vaca.

Hay siempre una cierta concentración bacteriana en el canal del pezón, pero la mayor parte de las bacterias se eliminan al comienzo del ordeño. Es conveniente separar en otra vasija los primeros chorros de leche que salen de la ubre, ya que son ricos en bacterias. Esta vasija debe llevar una tapa negra, ya que la leche floculada de animales enfermos se distingue rápidamente en contraste con el color de dicha tapa.

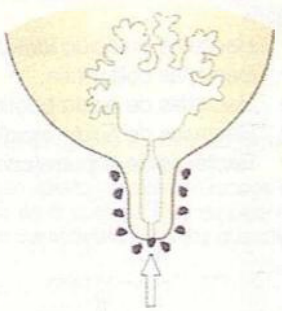


Fig. 4.11 *Las bacterias entran a través del canal del pezón.*

Infecciones en la granja

Durante su manejo en la granja, la leche está sujeta a infecciones por varios microorganismos, principalmente bacterias. El grado de infección y la composición de la población bacteriana dependen de la limpieza del entorno de la vaca y de la limpieza de las superficies de los utensilios que están en contacto con la leche, tales como cántaras, ordeñadoras, tamices, vasijas de recogida de la leche, depósitos y agitadores. Las superficies mojadas por la leche son normalmente una fuente de infecciones más importantes que la propia ubre.

Cuando las vacas se ordeñan a mano, las infecciones pueden tener su origen en el ordeñador, la vaca, el estiercol y el aire. La magnitud de dichas infecciones depende en gran medida de las condiciones higiénicas del ordeñador y de su habilidad, así como de la forma en que la vaca es tratada. La mayoría de estas fuentes de infección se eliminan con el ordeño mecánico, pero aparece otra nueva, que es la máquina ordeñadora. Un gran número de bacterias pueden infectar la leche de esta forma si el equipo de ordeño no se mantiene limpio.

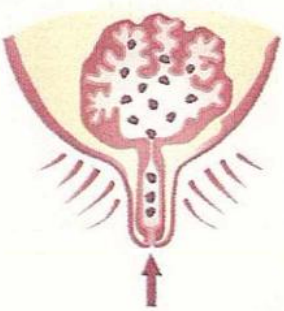


Fig. 4.12 *Durante la inflamación la ubre es fuertemente infectada por bacterias.*

Fig. 4.13 *Es aconsejable recoger la primera fracción de leche, rica en bacterias, extraída durante el ordeño de cada pezón, en un envase separado con tapa negra.*

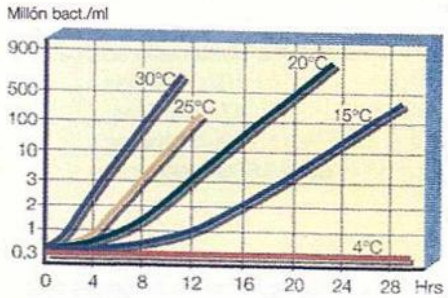


Fig. 4.14 *Influencia de la temperatura sobre el desarrollo bacteriano en la leche cruda.*

Los grupos de bacterias en la leche son:

- Bacterias de ácido láctico
- Bacterias coliformes
- Bacterias de ácido butírico
- Bacterias de ácido propiónico
- Bacterias de la putrefacción

Recuento de bacterias en la leche

Debido a su muy específica composición, la leche es susceptible de contaminación por una amplia variedad de bacterias.

La leche en la granja puede contener desde unos pocos miles de bacterias por mililitro, si se trata de una granja higiénica, hasta varios millones, si los niveles de limpieza, desinfección y enfriamiento son bajos. La limpieza y desinfección diaria de todos los equipos de ordeño y manejo de la leche, es el factor más decisivo que determina la calidad bacteriológica de la leche. En la leche considerada de la más alta calidad el recuento de bacterias, el UFC (Unidades Formadoras de Colonias), debe ser inferior a 100.000 por mililitro.

El enfriamiento rápido a temperaturas por debajo de 4ºC contribuye en gran medida a la buena calidad de la leche en la granja. Este tratamiento frena el crecimiento de las bacterias en la leche, mejorando así en gran medida sus cualidades para una mejor conservación.

El efecto de la temperatura sobre el desarrollo bacteriano en la leche cruda se muestra en la gráfica de la Figura 4.14. Comenzando en 300.000 UFC/ml se puede ver que la velocidad de desarrollo es mayor a temperaturas más elevadas, y que el efecto del enfriamiento a 4ºC consigue estabilizar este recuento inicial. El enfriamiento de la leche a 4ºC, o incluso más bajo, a 2ºC, tras el ordeño y su almacenamiento posterior en tanques aislados hace posible la recogida de leche con dos días de intervalo.

Principales bacterias en la leche

Muchas bacterias pueden encontrarse de forma casual en la leche. Pueden vivir e incluso reproducirse en ella, pero la leche es frecuentemente un medio de crecimiento inadecuado para ellas. Algunas de estas bacterias mueren cuando compiten con especies que encuentran este medio de cultivo más adecuado.

Los grupos de bacterias presentes en la leche pueden dividirse en bacterias acidolácticas, bacterias coliformes, bacterias del ácido butírico, bacterias formadoras de ácido propiónico y bacterias de la putrefacción.

Bacterias acidolácticas

Las bacterias acidolácticas se encuentran sobre las plantas en la naturaleza, pero algunas especies están en la leche en grandes cantidades. Otras se encuentran en los intestinos de los animales. El grupo incluye bacilos y cocos, que pueden formar cadenas de longitud variable pero que nunca dan lugar a esporas.

Las bacterias ácidolácticas son anaerobias facultativas. La mayor parte de ellas mueren por calentamiento a 70ºC, aunque la temperatura letal para algunas es de hasta 80ºC.

Las bacterias acidolácticas prefieren la lactosa como fuente de carbono. La fermentan dando lugar a ácido láctico. La fermentación puede ser pura o impura, es decir, el producto final puede ser casi exclusivamente ácido láctico (fermentación homofermentativa), o bien otras sustancias pueden ser producidas, tales como el ácido láctico, anhídrido carbónico e hidrógeno (fermentación heterofermentativa).

La capacidad fermentativa varía de acuerdo con las especies. La mayor parte de las bacterias acidolácticas forman entre un 0.5 y un 1.5% de ácido láctico, pero hay especies que pueden formar hasta un 3%.

Para su crecimiento, las bacterias acidolácticas necesitan compuestos nitrogenados orgánicos. Los consiguen de la caseina de la leche por rotura de la misma con la ayuda de enzimas proteolíticas. Sin embargo, la capacidad de descomponer la caseina varía mucho de una especie a otra.

Los tipos más importantes de bacterias acidolácticas, utilizadas en la industria láctea, aparecen en la Tabla 4.1, que tambien da los datos más importantes de las citadas especies. Algunas especies comunes de bacterias del ácido láctico mesófilas han sido recientemente rebautizadas sustituyendo *Lactococcus* (Lc.) por *Streptococcus* (Sc.) como nombre genérico. Así *Sc. lactis, cremoris y diacetilactis se* llaman ahora *Lc. Lactis, cremoris y diacetilactis,* respectivamente.

La tabla muestra que el *Streptococcus diacetilactis* y el *Leuconostoc cremoris* también pueden descomponer el ácido cítrico, que es fermentado, obteniéndose anhídrido carbónico y diacetilo. El anhídrido carbónico, que es producido por las bacterias acidolácticas cuando fermentan ácido cítrico y lactosa (también lactato) en el proceso de elaboración de queso, se acumula en los agujeros de los quesos, dando lugar a los clásicos ojos. Ver también el capítulo 14 sobre tratamiento

Tabla 4.1
Bacterias acidolácticas de importancia en la industria láctea

Especies	Temperatura óptima (°C)	Fermentan lactosa a ácido láctico	Fermentan lactosa a otras sustancias	Fermentan el ácido cítrico a	Enzimas proteolíticas	Utilizadas en
Str. thermophilus	40 - 45	0.7 - 0.8	–	–	Sí	Leche acidificada, queso
Str. lactis	25 - 30	0.5 - 0.7	–	–	Sí	Leche acidificada
Str. cremoris	25 - 30	0.5 - 0.7	–	–	Sí	Leche acidificada
Str. diacetilactis	25 - 30	0.3 - 0.6	–	CO_2, volátiles, diacetilo	Sí	Leche acidificada, queso, mantequilla
Leuc. cremoris	25 - 30	0.2 - 0.4	CO_2	CO_2, volátiles diacetilo	Sí	Leche acidificada
Lb. acidophilus	37	0.6 - 0.9	–	–	–	Leche acidificada
Lb. casei	30	1.2 - 1.5	–	–	Sí	Queso
Lb. lactis	40 - 45	1.2 - 1.5	–	–	Sí	Queso
Lb .helveticus	40 - 45	2.0 - 2.7	–	–	Sí	Leche acidificada, queso
Lb. bulgaricus	40 - 45	1.5 - 2.0	–	–	Sí	Leche acidificada
Bifidobacterium	37	0.4 - 0.9	Ácido acético	–	–	Leche acidificada

Str = Streptococcus Leuc. = Leuconostoc
Lc = Lactococcus Lb. = Lactobacillus

de la cuajada. El anhídrido carbónico da un aroma suave a los cultivos iniciadores de la industria láctea (cultivo madre y cultivo industrial) y a los productos lácteos acidificados. El diacetilo formado por la fermentación del ácido cítrico da un característico aroma a los cultivos iniciadores, leches acidificadas y mantequilla.

El *Sc. thermophilus* es, como su nombre indica, una bacteria termófila. Se encuentra siempre presente en la leche pasterizada HTST y se desarrolla mejor a 40-50°C, llegando a sobrevivir 30 minutos a 65°C. El *Lactobacillus helveticus* y *Lb. bulgaricus* son los bacilos responsables de la maduración del queso Emmental. Se le añaden a la leche en forma de cultivo puro para la elaboración del queso, junto con el Str. thermophilus.

Los productos lácteos acidificados se fabrican actualmente con *L. acidophilus* y *Bifidobacteria*, bien juntos o separadamente. Ambos cultivos son capaces de sobrevivir al paso a través del estómago humano, donde se tiene un pH del orden de 2. Estos cultivos tienen la habilidad de colonizar la pared del intestino, lo que contribuye a la reducción del crecimiento de *E. coli* y otras bacterias indeseables, ayudando así a prevenir la diarrea.

Fig. 4.15 *El dióxido de carbono formado cuando las bacterias acidolácticas fermentan citrato y lactosa se recoge en burbujas en la cuajada. Esto da lugar a los agujeros característicos de los quesos de ojos.*

Bacterias coliformes

Las bacterias coliformes son anaerobias facultativas con una temperatura óptima de 30-37°C. Se encuentran en los intestinos, estiercol, suelo, aguas contaminadas y en plantas. Fermentan la lactosa produciendo ácido láctico y otros ácidos orgánicos, anhidrido carbónico e hidrógeno y descomponen las proteinas de la leche, dando lugar a un olor y un sabor desagradables. Algunas bacterias coli también causan mastitis.

Las bacterias coliformes pueden causar serios problemas durante la fabricación del queso. Además de causar malos sabores, la formación relativamente fuerte de gas dará lugar a una textura indeseada en las fases iniciales (como hinchamiento, tal como se ve en la Figura 4.16). El metabolismo de las bacterias coliformes cesa a un pH justo por debajo de 6. Esto explica su actividad en la primera fase de fermentación, antes de que toda la lactosa se desdoble.

Las bacterias coliformes son destruidas por la pasteurización HTST. Se utilizan para controles de calidad microbiológica rutinaria en industrias lácteas. Si se las encuentra en la leche y en las tuberías después de la pasteurización es señal de que se ha producido una reinfección que indica que las rutinas de limpieza y desinfección deben ser mejoradas. Si no se detecta la presencia de bacterias coliformes, los procedimientos de limpieza de los equipos pueden considerarse como satisfactorios. Un test bacteriológico incluso mejor sería el de enterobacterias gram-negativas, que incluyen *Pseudomonas* y coliformes.

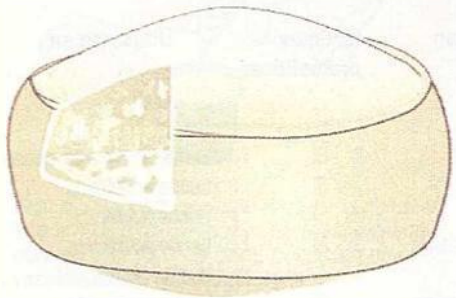


Fig. 4.16 *Las bacterias coliformes pueden causar graves problemas en la fabricación de queso. Estas bacterias emiten grandes volúmenes de gas, dando lugar a quesos hinchados y con mal sabor.*

Bacterias ácido-butíricas "destructoras de quesos"

- *Clostridium tyrobutyricum*
- *Clostridium butyricum*

Bacterias formadoras de ácido butírico

Las bacterias ácido-butíricas son muy comunes en la naturaleza. Se las encuentra en suelos, plantas, estiercol, etc., y llegan muy fácilmente a la leche. Los piensos y ensilados almacenados en condiciones defectuosas, contaminados con el suelo, pueden tener unos recuentos muy altos de esporas de bacterias ácido-butíricas. Como consecuencia, la leche puede ser infectada de forma importante por organismos y esporas de este tipo.

Las bacterias ácido-butíricas son del tipo anaerobio, forman esporas y tienen una temperatura óptima de crecimiento de 37°C. No se desarrollan bien en leche que contenga oxigeno, pero sí lo hacen en los quesos donde las condiciones anaerobias prevalecen sobre las demás.

Las propiedades del queso como medio de cultivo bacteriológico cambian durante los primeros días después de su fabricación. Comienza siendo preferentemente un sustrato azucarado, para transformarse gradualmente en un sustrato de lactato. El azúcar (lactosa) es fermentada, produciéndose ácido láctico, que es neutralizado por el calcio y otras sustancias minerales, dando lugar al lactato cálcico. La fermentación ácido-butírica, que tiene lugar durante las primeras semanas después de la fabricación del queso, es provocada por bacterias ácido-butíricas que fermentan la lactosa. Si la fermentación se produce más tarde, ésta es debida a bacterias ácido-butiricas que fermentan el lactato. Estos procesos fermentativos dan lugar a grandes cantidades de anhidrido carbónico, hidrógeno y ácido butírico. El queso presenta una textura irregular y un sabor rancio dulce de ácido butirico.

Se puede distinguir entre el *Clostridium butiricum* móvil, un grupo que contiene fermentadores tanto de lactosa como de lactato, y el *Clostridium tirobutiricum*, que fermenta los lactatos (sales ácidolácticas), y que puede causar fermentaciones ácido-butíricas tardías. La primera bacteria ácido-butírica nombrada puede originar fermentaciones ácido-butíricas tempranas y tardías en el queso.

A traves de los años, grandes cantidades de queso se han estropeado por las fermentaciones ácido-butíricas. Estas bacterias no pueden ser destruidas por pasteurización, ya que forman esporas resistentes al calor. En la práctica es necesario recurrir a técnicas especiales de ingeniería de producción para prevenir las fermentaciones ácidobutíricas.

Una de las técnicas consiste en la adición de nitrato potásico a la leche que se va a utilizar para la fabricación de queso, ya que tiene un efecto inhibidor sobre las bacterias ácido-butíricas. Sin embargo, como el uso de este tipo de sal ha sido prohibido en gran cantidad de paises porque puede dar lugar a la formación de carcinógenos, se ha de considerar otros medios de prevención de la fermentación del ácido butírico.

La sal común (Cloruro sódico) tiene un efecto muy fuerte sobre dichas bacterias. Es importante que la sal alcance sobre la bacteria tan pronto como sea posible. Esto explica el porqué los quesos salados en la cuajada (salado en seco) muestran tan baja tendencia a la fermentación ácido-butírica.

El salado no debe ser muy fuerte, ya que existe el riesgo de inhibir las bacterias ácido-lácticas que se deben desarrollar en el queso.

Las esporas de las bacterias ácido-butíricas son relativamente pesadas, lo que ha dado origen al desarrollo de una técnica que las separa de la leche por fuerza centrifuga. Esta técnica, conocida como bactofugación, será descrita más tarde. Se utiliza cada vez con más frecuencia, ya que son muchos los paises que prohiben el uso del nitrato potásico como aditivo en los quesos.

Otra técnica recientemente adoptada para reducir las bacterias en la leche es la microfiltración, que se describe en los capítulos 6.4 y 8.

Bacterias formadoras de ácido propiónico

La categoría de las bacterias ácido-propiónicas comprende un número de especies variadas en apariencia. No forman esporas, su temperatura óptima es de alrededor de 30°C y varias especies sobreviven a la pasteurización HTST. Fermentan el lactato dando lugar a ácido propiónico, anhidrido carbónico y otros productos.

Los cultivos puros de bacterias ácido-propiónicas se utilizan (junto con ciertos lactobacilos y lactococos) en la fabricación de los quesos Emmental, Gruyère, Jarslberg, Grevé y Maasdam, donde son responsables de la formación de ojos y contribuyen a su característico sabor.

Bacterias de la putrefacción

Las bacterias de la putrefacción son aquellas que segregan enzimas proteolíticas. Pueden, por lo tanto, descomponer las proteinas hasta llegar al amoniaco. Este tipo de descomposición es conocido como putrefacción. Algunas de ellas son utilizadas en procesos lácteos, pero en general son bacterias que pueden originar problemas.

La categoria de las bacterias de la putrefacción comprende un gran número de especies, tanto cocos como bacilos, que crecen tanto aeróbica como anaeróbicamente. Contaminan la leche procedentes del estiercol, piensos y agua. Muchas de ellas producen la enzima lipasa, lo que significa que también pueden descomponer las grasas.

Brevibacterium linens es una bacteria de la putrefacción que forma una capa rojo-amarillenta sobre el queso. Sobre la superficie del queso Port Salut descompone las proteinas durante la maduración y contribuye a la formación de aromas. Al contrario que otros muchos microorganismos, es altamente resistente a la sal.

Algunas bacterias indeseables de la putrefacción pueden encontrarse en la leche y sus productos derivados. Una de ellas es la *Pseudomonas fluorescens*, que se encuentra normalmente en suelos y aguas contaminadas. Produce lipasa y proteasa muy resistentes al calor, y su presencia es, por lo tanto, perturbadora en la mantequilla, que es fácilmente contaminada por esta bacteria a través de las aguas de enjuague de mala calidad. Las bacterias de este género Pseudomonas son las gram-negativas que contaminan más frecuentemente después de la pasteurización, y crecen en la leche a bajas temperaturas.

Además de la lipasa, algunas bacterias de la putrefacción no deseadas producen un tipo de enzima como la renina. Pueden, por lo tanto, coagular la leche sin acidificarla (coagulación dulce). En verano y otoño sucede a veces que la leche procedente de algún granjero poco escrupuloso se encuentra fuertemente infectada de estas bacterias.

Un típico productor de gas es el *Clostridium sporogenes*, bacilo móvil, anaeróbio y formador de esporas. Se puede encontrar en pienso fermentado, agua, suelos, y también en los intestinos. La leche es fácilmente infectada por esta bacteria o sus esporas. Puede producir, bajo condiciones anaerobias, en quesos particularmente procesados, poderosas fermentacicnes ("queso maloliente").

Bacterias de la putrefacción:
- *Brevibacterium linens (útil)*
- *Pseudomonas fluorescens (dañina)*
- *Clostridium sporogenes (dañina)*

Los hongos

Los hongos son un grupo de microorganismos que se encuentran frecuentemente en la naturaleza, en las plantas, animales y seres humanos. Las diferentes especies de hongos varian enormemente en estructura y métodos de reproducción. Los hongos pueden ser redondos, ovalados o en forma de fibras. Las fibras pueden formar un entramado o red, visible a simple vista, como por ejemplo los mohos en los alimentos. Los hongos se dividen en levaduras y mohos.

Los hongos se dividen en :
- levaduras
- mohos

Las levaduras

Las levaduras son organismos celulares de forma esférica, elíptica o cilíndrica. El tamaño de las células de levadura varía considerablemente. La levadura de cervecería, *Sacaromices cerevisiae*, tiene un diámetro del orden de 2-8 μm y una longitud de 3-15 μm. Algunas levaduras de otras especies pueden llegar a tener una longitud de 100 μm.

La Figura 4.17 muestra la estructura de una célula de levadura. Contiene citoplasma y un núcleo claramente discernible. La célula se encuentra rodeada por una pared y una membrana que es permeable a los nutrientes que vienen del exterior de la célula y a los productos de desecho de su interior. La célula contiene una vacuola que sirve de almacén para nutrientes de reserva y para productos de desecho antes de su eliminación. Los glóbulos de grasa y particulas de hidratos de carbono están embebidos en el citoplasma. La mitocondria, donde se genera la energía necesaria para el crecimiento de la célula, así como los ribosomas, se encuentra en el citoplasma.

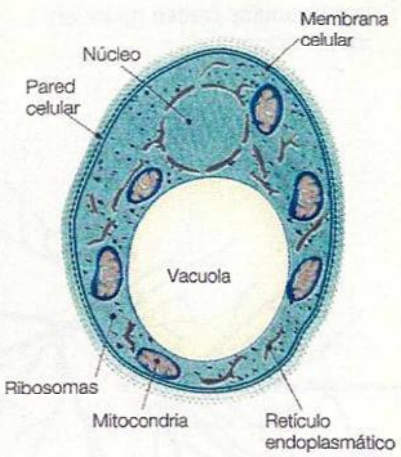


Fig. 4.17 *Estructura de una célula de levadura.*

Reproducción de las levaduras

Las células de levadura se reproducen normalmente por gemación, como se muestra en la Figura 4.18, aunque otros métodos de reproducción también son posibles. La gemación es un proceso asexual. Una pequeña protuberancia se de-

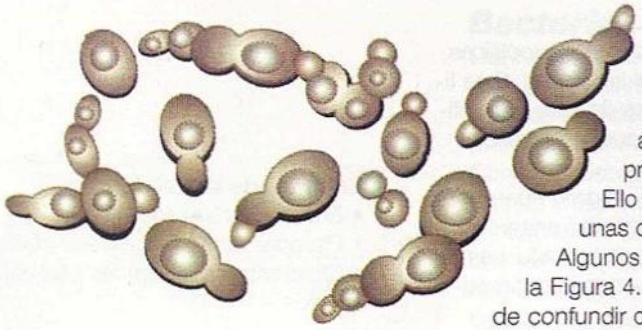


Fig. 4.18 *Divisón de células de levadura.*

sarrolla sobre la pared de la célula madre. Comparten el citoplasma durante un tiempo. Finalmente, la protuberancia es aislada de la célula madre por una doble pared.

La nueva célula no siempre se separa y puede permanecer unida a la célula madre mientras se forman nuevas protuberancias. Estas protuberancias pueden a su vez formar otras nuevas sobre ellas. Ello da lugar a la formación de grandes racimos de células unidas unas con otras.

Algunos tipos de levadura se reproducen sexualmente, tal como se ve en la Figura 4.19, formando esporas, ascosporas y basidiosporas (que no se han de confundir con las esporas bacterianas). Dos células se funden juntas y los dos nucleos también se funden. A continuación de la división del material nuclear se forman ocho ascosporas dentro de las células, conteniendo cada una, una dotación similar de ADN. Cuando las esporas están maduras salen de la célula y comienzan a germinar, formando nuevas células que se reproducen asexualmente por gemación.

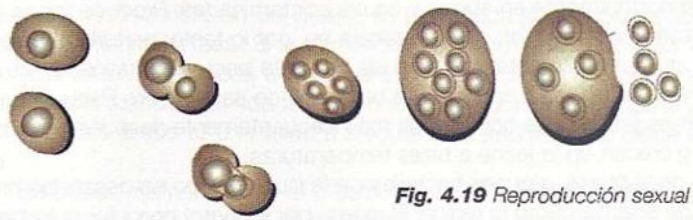


Fig. 4.19 *Reproducción sexual de las levaduras.*

Factores importantes para el desarrollo de las levaduras:
- nutrientes
- humedad
- acidez
- temperatura
- oxígeno

Condiciones para el crecimiento de las levaduras

Nutrientes

Las levaduras tienen las mismas necesidades de nutrientes que otros organismos vivos. Como las bacterias, tienen un sistema intracelular y extracelular de enzimas, capaces de descomponer grandes moléculas presentes en el sustrato hasta dejarlas con un tamaño manejable por el metabolismo de la célula.

Humedad

Como las bacterias, las levaduras necesitan tener acceso al agua para poder vivir, pero requieren menos cantidad de agua que las bacterias. Algunas pueden crecer en medios con muy baja humedad, tales como la miel o la mermelada. Esto quiere decir que pueden soportar una presión osmótica relativamente alta.

Las levaduras crecen mejor en medio ácido.

Acidez

Las levaduras pueden desarrollarse en medios con un pH oscilante entre 3 y 7.5. El óptimo es usualmente 4.5-5.0.

Temperatura

Las células de levadura no crecen normalmente a temperaturas por debajo del punto de congelación del agua o por encima de 47ºC. Su temperatura óptima se encuentra normalmente entre 20 y 30ºC.

Las células en crecimiento mueren normalmente cuando se las somete a temperaturas de 52 a 58ºC durante 5 a 10 minutos. Las esporas (ascosporas) son más resistentes, pero mueren cuando se las expone a 60-62ºC durante unos pocos minutos.

Oxígeno

Las levaduras tienen la capacidad de desarrollarse tanto en presencia como en ausencia de oxígeno atmosférico, ya que son anaerobias facultativas. En ausencia de oxígeno, las levaduras descomponen el azúcar en alcohol y agua, mientras que en presencia del oxígeno descomponen el azúcar en anhídrido carbónico y agua. Las células de levadura crecen más deprisa en presencia de oxígeno.

Las levaduras pueden provocar defectos en el queso y la mantequilla.

Clasificación de las levaduras

Las levaduras se dividen en tres grupos, según su capacidad de producir esporas (ascosporas y basidiosporas). Las cepas que forman esporas pertenecen al grupo

de los *Ascomicetos* y *Basidiomicetos*. Las que no producen esporas pero se reproducen principalmente por gemación pertenecen al grupo de los *hongos imperfectos* o "falsas levaduras".

Importancia de las levaduras

Las levaduras son generalmente organismos no deseados desde el punto de vista de la industria láctea, con una excepción. El kefir, un producto fermentado de origen ruso, se fermenta con una mezcla de cultivos de levaduras y bacterias acidolácticas en agregados con forma de granos. Las levaduras, por tanto, no son bien recibidas en la industria láctea, ya que causan serios defectos en los productos fermentados, como el queso y la mantequilla. Por otra parte, en las industrias cervecera, panadera y en las destilerías son muy importantes en los procesos.

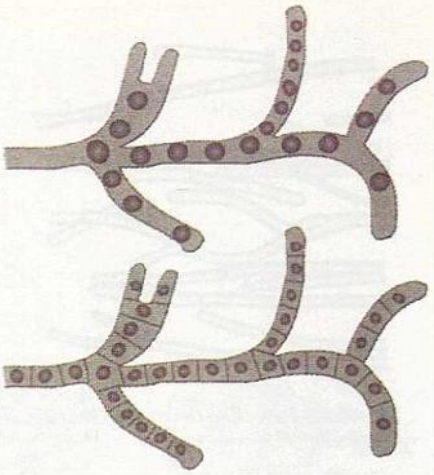


Fig. 4.20 *Dependiendo del grupo, los mohos poseen hifas con o sin paredes internas.*

Los mohos

La categoría de los mohos comprende un grupo bastante heterogéneo de hongos multicelulares y con forma de fibras (hifas). Superficialmente, se parecen mucho los unos a los otros, pero en realidad hay grupos muy diferentes.

Los hongos tienen una estructura muy ramificada llamada micelio, que puede ser pequeño o lo suficientemente grande para ser observado a simple vista. El micelio consta de ramificaciones individuales llamadas hifas. En algunos, las hifas son largas, conteniendo muchos núcleos, mientras en otros están divididas en células mononucleares por muros de partición. Estas hifas constituyen la parte vegetativa, a menudo incoloras, que segregan enzimas que degradan el alimento (ver Figura 4.20).

Conforme crece la colonia de mohos, las hifas y los micelios se orientan hacia fuera desde el centro.

Reproducción de los mohos

Los mohos se reproducen por medio de esporas de diversos tipos. Tanto la reproducción sexual como la asexual pueden tener lugar en mohos de la misma especie. Las esporas tienen normalmente unas paredes gruesas y son relativamente resistentes a la desecación y al calor. Un moho puede permanecer aletargado en forma de espora durante un período de tiempo muy largo.

Las esporas *asexuales*, conidias, representan el método más común de reproducción, y son producidas normalmente en enormes cantidades (Figura 4.21). Son pequeñas y ligeras y pueden ser transportadas por el viento, que esparce los mohos de unos a otros lugares. Este es un suceso diario y común.

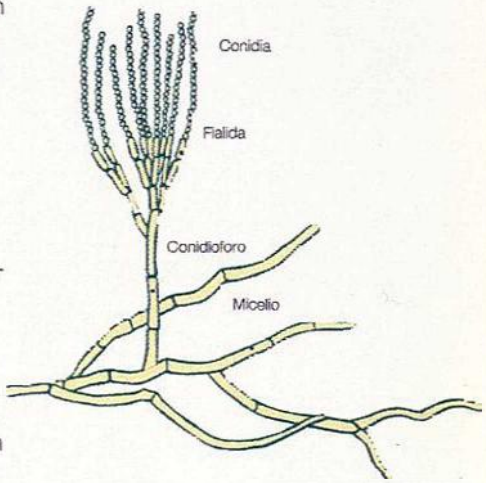


Fig. 4.21 *Penicilium sp. Mycelium con conifióforos que producen cadenas de conidia.*

Metabolismo de los mohos

El metabolismo de los mohos es similar al de las bacterias y levaduras. Están bien equipados de enzimas, que son utilizadas para la descomposición de distintas sustancias orgánicas. Desde el punto de vista lácteo, la acción de los mohos sobre las grasas y proteinas es de un interés particular. En la Figura 4.22 se ilustra el crecimiento del micelio de moho.

Factores externos que afectan al crecimiento de los mohos

Humedad

Los mohos pueden crecer sobre materiales con un contenido de humedad muy bajo y pueden extraer agua del aire húmedo.

Actividad de agua (a_w)

Los mohos son más tolerantes a bajos niveles de a_w que las bacterias. Algunos pueden tolerar concentraciones de azúcar y sal con alto nivel de presión osmótica.

Ejemplo: conservas de frutas y leche condensada.

Oxígeno

Los mohos normalmente se desarrollan en condiciones aeróbias. El oxígeno es necesario para la formación de conidias, pero no para el crecimiento del micelio.

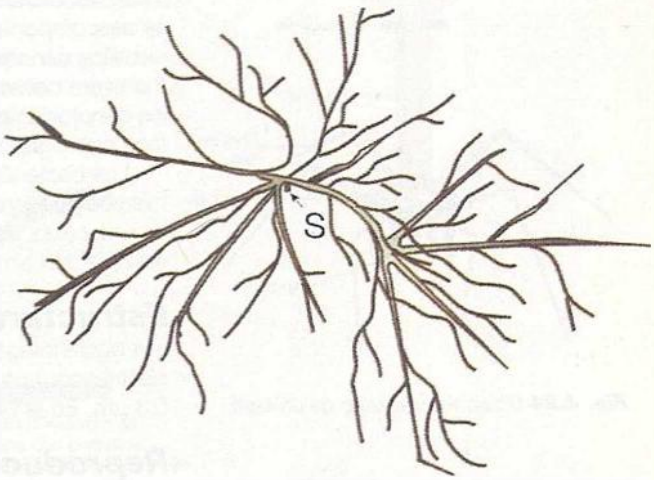


Fig. 4.22 *Crecimiento del micelio de un hongo sobre agar de malta, a partir de una espora (S) tras un día de crecimiento a 20°C.*

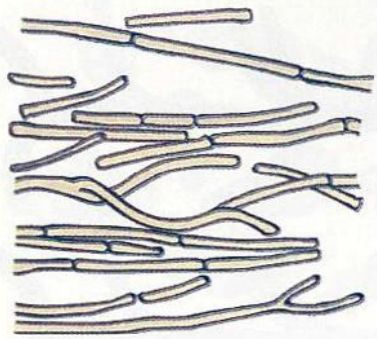


Fig. 4.23 *Estructura del moho Geotrichum candidum.*

Temperatura

La temperatura óptima de crecimiento para la mayoría de los mohos se sitúa entre 20 y 30ºC.

Acidez

Los mohos pueden desarrollarse en medios con valores de pH situados entre 3 y 8.5. Muchas especies, sin embargo, prefieren un entorno ácido. Ejemplo: yogur, queso, frutos cítricos y zumos de frutas.

Importancia de los hongos en la industria láctea

Así como las levaduras, los mohos no sobreviven a las temperaturas de una pasteurización normal, de 72-74ºC durante 10 a 15 segundos. La presencia indeseada de estos organismos es por tanto una señal de reinfección.

Hay diferentes familias de mohos. Los que son de importancia en la industria láctea son el Penicillium y el moho de la leche, *Geotrichum candidum*.

Penicillium

El género *Penicillium* es uno de los mas comunes en los mohos. Las hifas formadoras de esporas de esta familia están ramificadas en la punta, pareciendo una brocha. Los mohos verdes, muy comunes en la naturaleza, pertenecen a esta familia. Algunas especies de penicilia juegan un papel importante en los procesos lácteos. Sus poderosas propiedades de descomposición de proteinas y grasas les hacen los principales agentes de la maduración de los quesos Azules, Camembert, etc. El moho del queso azul se llama *Penicillium roqueforti,* y el moho del Camembert, *Penicillium camemberti.*

El moho de la leche

El moho de la leche *Geotrichum candidum* se encuentra en la frontera entre mohos y levaduras. Su reproducción es similar a la de las levaduras -la parte más exterior de la hifa se separa en un proceso que se parece a la gemación. Su estructura se muestra en la Figura 4.23. Los mohos aparecen en la superficie de las leches fermentadas como una capa fina blanquecina y aterciopelada. Este moho contribuye a la maduración de quesos blandos y semiblandos. Puede provocar rancidez en la mantequilla.

Los mohos en las superficies de los quesos y mantequillas pueden producir decoloración y dar también al producto un aroma desagradable. La higiene más estricta es necesaria en la industria láctea con objeto de prevenir que sus productos se vean afectados por mohos durante su tratamiento. Por ejemplo, las paredes y los techos deben mantenerse escrupulosamente limpios con objeto de evitar que los mohos crezcan en ellos.

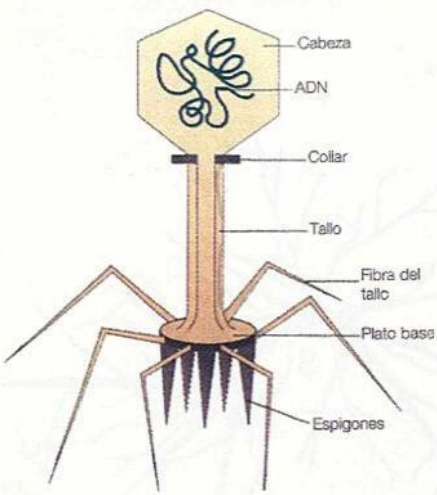


Fig. 4.24 *Dibujo esquemático de un fago.*

Bacteriófagos

Twort, un científico inglés, descubrió en 1915 que ciertos cultivos de estafilococos se descomponían y reducían a trozos. Un par de años más tarde, d'Herelle, un científico canadiense, tras observar fenómenos similares, postuló que este fenómeno era causado por organismos invisibles que se alimentaban de bacterias. El los denominó "bacteriófagos" (la última parte de esta palabra procede del griego fago que significa comer).

Los bacteriófagos serían entonces virus, y son parásitos bacterianos. Por ellos mismos pueden subsistir, pero no pueden crecer ni replicarse si no están dentro de una célula bacteriana. Tienen con los huéspedes mucha especificidad, por ejemplo con simples especies de cepas de bacterias.

Estructura de los bacteriófagos

Los bacteriófagos, o fagos, sólo pueden ser vistos por medio de un microscópio electrónico. Los fagos tienen una "cabeza" y una "cola", y un tamaño de 0.03 a 0.3 µm. En la Figura 4.24 se muestra un dibujo esquemático de un fago.

Reproducción de los fagos

Los fagos sólo atacan bacterias, normalmente aquellas jóvenes que crecen activamente, dentro de las cuales se pueden reproducir. La bacteria a continuación se

desintegra, soltando de 10 a 200 fagos por bacteria para atacar nuevas víctimas. El escenario se muestra en la Figura 4.25.

El fago ataca a la superficie de su huesped (1), y el ADN es inyectado en el interior de la célula. La "maquinaria" celular produce entonces un nuevo ADN fago y proteinas fago (2; 3). Los nuevos fagos se reunen en el interior de la célula bacteriana (4), que es lisada (5) saliendo al exterior los fagos maduros.

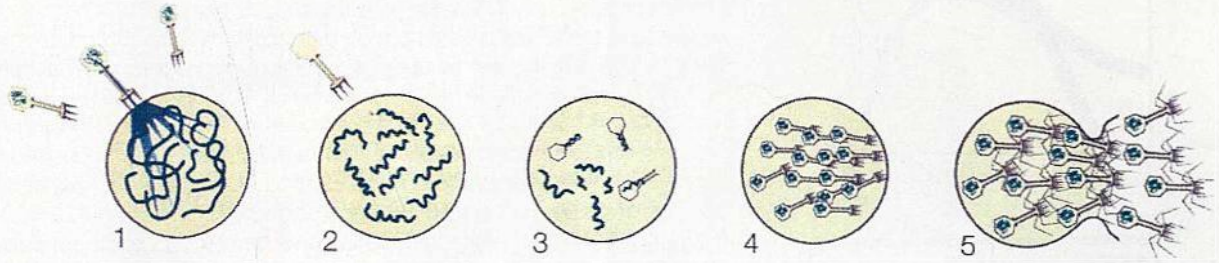


Fig. 4.25 *Dibujo esquemático de la propagación de bacteriófagos.*

Conclusiones

La gran variedad de bacterias, levaduras y mohos y su amplia gama de actividades son de gran interés para la vida en la tierra en general y para los humanos en particular.

Los microorganismos presentes en el suelo y el agua son los responsables de la degradación de las fuentes disponibles de materia orgánica reduciendo ésta a formas que pueden ser asimilables por las plantas. De esta forma, contribuyen con un servicio indirecto al reino animal donde se incluiría el hombre.

Los humanos son los mayores beneficiarios directos de los microorganismos. Los microorganismos formadores de ácido láctico pueden ser utilizados, por ejemplo, para conservar forrajes (ensilados) para el ganado. El mismo principio se aplicaría a la reparación de ciertos alimentos tales como el sauerkraut, olivas verdes y pepinillos.

Los microorganismos tienen gran importancia en la fabricación de muchos productos lácteos, tales como el yogur, queso y mantequilla fermentada. La elección de los tipos más adecuados de microorganismos es un factor importante en la maximización de la calidad de estos productos.

Los microorganismos que se utilizan en la fabricación de los productos lácteos son normalmente suministrados por empresas especializadas en el desarrollo y propagación de microorganismos, cosa que realizan en unas estrictas condiciones higiénicas. Los microorganismos que se utilizan en las industrias lácteas se denominan cultivos iniciadores o "starter". Estos son una mezcla de organismos que forman ácido láctico por fermentación de la lactosa de la leche. Sin embargo, es importante que la calidad de los cultivos iniciadores se conserve tras su llegada a la industria láctea manteniendo unos niveles elevados de higiene en todos los pasos de la línea de proceso.

En este contexto se debe resaltar que la leche puede contener residuos de antibióticos procedentes de tratamientos de las vacas que hayan sufrido mastitis. Lo más común es encontrar penicilina. A pesar de la existencia de regulaciones y nor-

Niveles de penicilina que inhiben algunos microorganismos.

Microorganismos	Penicilina (U.I.)*/ml
Lactococcus lactis	0.1 - 0.25
Lactococcus cremoris	0.05 - 0.1
Streptococcus thermophilus	0.01 - 0.05
Lactobacillus bulgaricus	0.25 - 0.5
Starter (cultivo mezcla)	0.25 - 0.5

**U.I. = Unidades Internacionales (La penicilina causa lisis de las células bacterianas)*

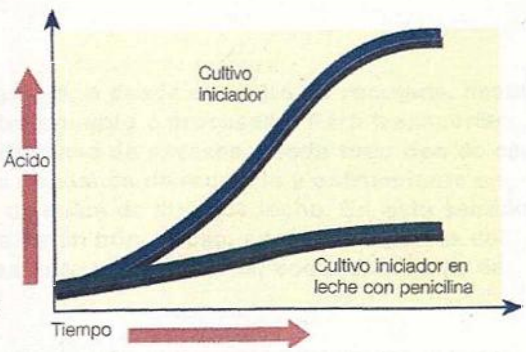
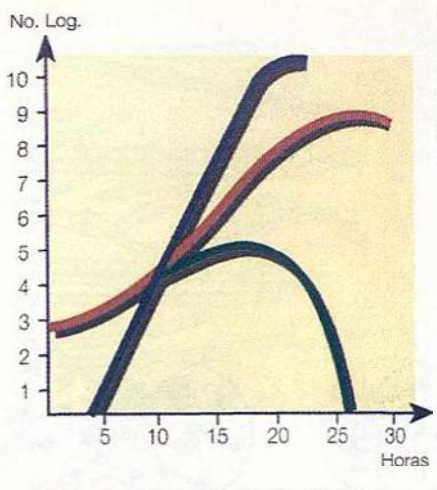


Fig. 4.26 *Efecto de la penicilina en la producción de ácido en la leche.*



Ref.: Nordisk Mejeriindustri 4/82

Fig. 4.27 *Crecimiento de cultivo bacteriano y fagos e influencia sobre un cultivo iniciador infectado.*

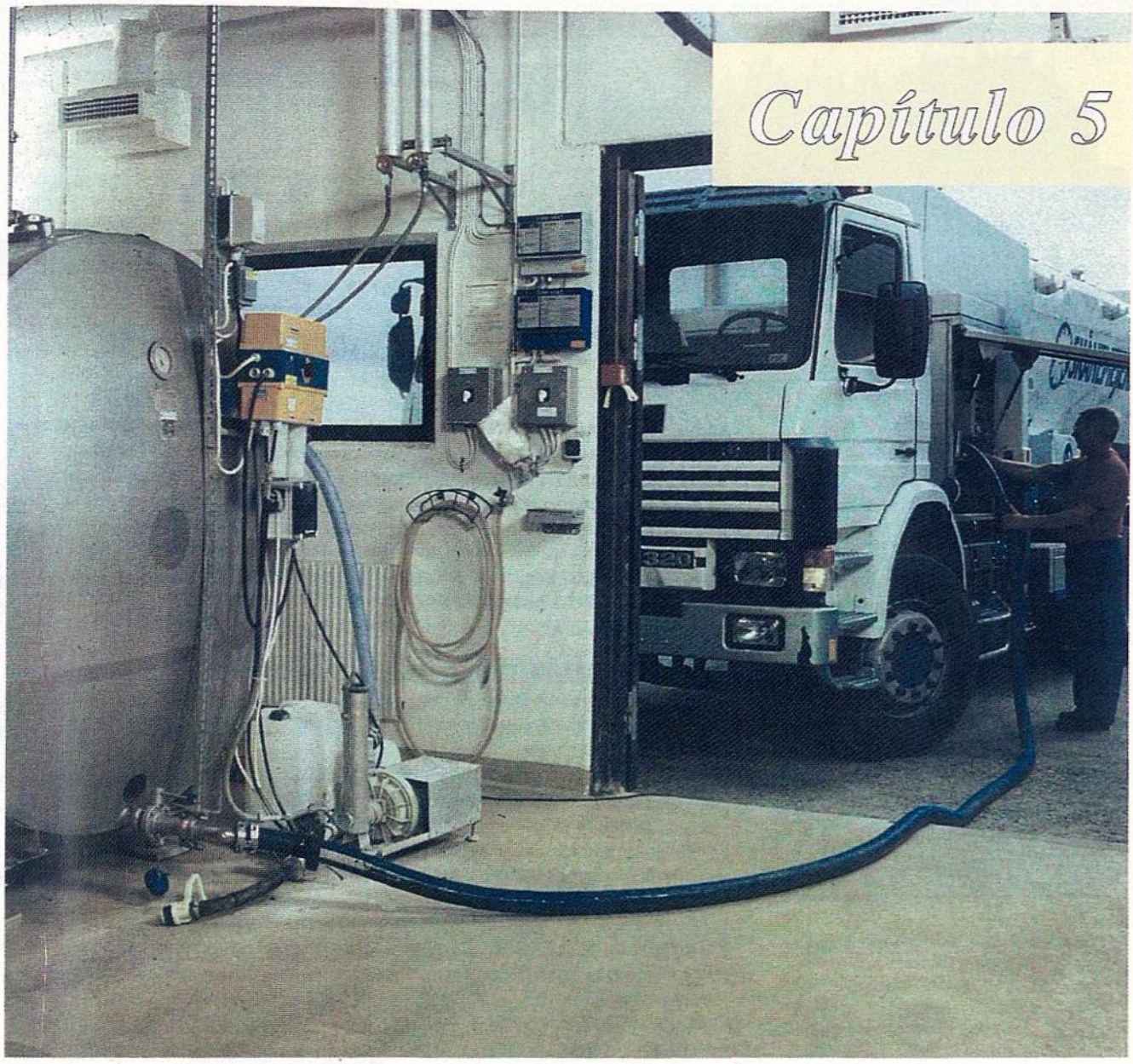
mas que indican que la leche de vacas tratadas con antibióticos no ha de ser enviada a la industria láctea, es relativamente fácil encontrar altos niveles de antibióticos en la leche cruda, suficientes como para detener o retardar el crecimiento de los cultivos iniciadores que se utilicen. Pero, más serio aún es que los niños que consuman leche contaminada con antibióticos pueden volverse hipersensibles a las inyecciones de antibióticos cuando los necesiten, y su sistema digestivo puede también alterarse. La Figura 4.26 ilustra la influencia de pequeños residuos de penicilina sobre el cultivo iniciador más usual.

Como la leche cruda está normalmente contaminada con bacteriófagos, es importante que la leche que se utilice con cultivos iniciadores, normalmente leche desnatada, sea calentada hasta por lo menos 90°C durante 30 minutos para inactivar los fagos. La Figura 4.27 muestra lo que puede suceder si esto no se hace o si la leche se recontamina después con fagos. En el tiempo necesario para que una bacteria "no infectada" produzca cuatro nuevas bacterias mediante dos generaciones de fisión, un bacteriófago ha crecido hasta un total de 22.500 fagos (Figura 4.28). Ni que decir tiene que la curva de crecimiento de un cultivo iniciador infectado con fagos se colapsa de repente después de algún tiempo (Figura 4.27).

Fig. 4.28 *Comparación entre velocidades de reproducción de cultivos iniciadores bacterianos y fagos.*

Podría ser una falsa idealización de los microorganismos si se omite que algunos de ellos -los microorganismos patógenos- son vistos como los principales enemigos a combatir. Aunque es cierto que los patógenos son mucho menos numerosos que los que son inocuos o usuales, sus efectos son mucho más visibles.

Prácticamente en todas partes, los gobiernos de cada pais han establecido leyes que obligan a realizar la pasteurización de la leche producida en la central lechera y suministrada para su consumo. Una típica combinación tiempo/temperatura para la pasteurización es 72°C/15-20 segundos, que elimina todos los patógenos. Es desde luego importante que el personal implicado en la producción no sufra ninguna enfermedad que pueda accidentalmente reinfectar la leche pasteurizada antes de que sea envasada.



Capítulo 5

Recogida y recepción de la leche

La leche se lleva desde la granja, o desde el centro de recogida, hasta la industria láctea para su tratamiento o procesado. Para transportar la leche se han utilizado toda clase de envases, desde todo tipo de cacharros hasta los modernos depósitos de recogida y enfriamiento en la granja, con capacidades de miles de litros de leche. En este sentido es interesante destacar que están aún en uso, en muchas partes del mundo, algunos envases bastante rudimentarios, como calabazas de 2-3 litros.

Antiguamente, cuando las centrales eran de reducidas dimensiones, la recogida se limitaba a las granjas cercanas. Los microorganismos en la leche eran con-

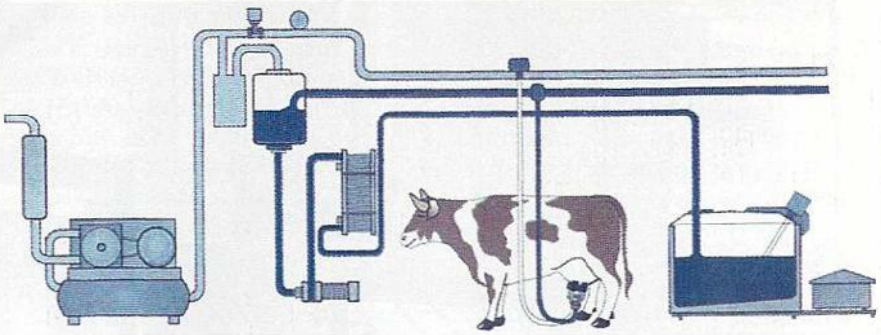


Fig. 5.1 *La leche circula por un sistema cerrado desde la vaca hasta el tanque de enfriamiento.*

trolados con un mínimo de enfriamiento, ya que las distancias eran cortas y la leche se recogía diariamente.

En la actualidad se tiende a industrias lácteas cada vez de mayores dimensiones. Por otra parte, el aumento de la demanda exige producciones mayores pero sin una reduccion en la calidad del producto acabado. La leche debe ser traida desde distancias mayores, lo que quiere decir que la recogida diaria muchas veces queda fuera de lugar. En la actualidad, normalmente la recogida se realiza cada dos días. Pero los intervalos son a menudo de hasta tres o incluso cuatro días.

Mantenimiento de la leche fría

La leche debe ser enfriada por debajo de +4ºC inmediatamente después del ordeño, y se debe mantener a esa temperatura durante todo el tiempo que transcurra hasta llegar a la industria.

Si la cadena de frío se rompe en algún punto del camino, por ejemplo durante el transporte, los microorganismos de la leche comenzarán a multiplicarse. Ello da origen al desarrollo de varios productos metabólicos y enzimas. Un posterior enfriamiento detendrá esos desarrollos, pero el daño ya ha sido hecho. El recuento de bacterias será más alto y la leche contendrá sustancias que afectarán negativamente a la calidad del producto final.

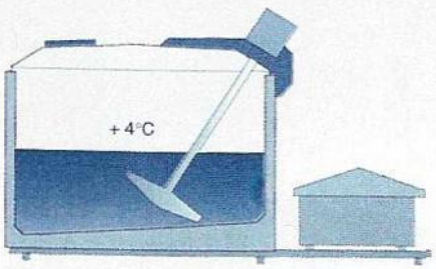


Fig. 5.2 *Tanque de enfriamiento con agitador y unidad de enfriamiento.*

Diseño de las instalaciones de la granja lechera

Los primeros pasos para mantener adecuadamente la calidad de la leche se deben dar en la granja. Las condiciones durante el ordeño tienen que ser lo más higiénicas posibles. El sistema de ordeño se diseñará para evitar la aireación de la leche y se dispondrá de un equipo de enfriamiento correctamente dimensionado.

Con objeto de cumplir estos requisitos higiénicos, las granjas deben tener salas especiales para almacenamiento refrigerado. Los depósitos refrigerados son cada vez más comunes en las citadas granjas. Estos depósitos (Figura 5.2), con una capacidad de 250 a 10.000 litros, van provistos de un agitador y un equipo de enfriamiento para cumplir ciertas estipulaciones, como por ejemplo que toda la leche del depósito pueda ser enfriada por debajo de +4ºC dentro de las dos horas siguientes al ordeño.

Las granjas de mayores dimensiones, que producen grandes cantidades de leche, a menudo instalan unidades enfriadoras de leche separadas del tanque de almacenamiento refrigerado (Figura 5.1). Esto evita que la leche que se obtiene caliente de la vaca se mezcle con la ya enfriada.

La sala reservada para el almacenamiento de la leche en la granja debe estar provista también de equipos para la limpieza y desinfección de los utensilios, sistema de tuberías y depósito de enfriamiento.

Fig. 5.3 *Una cubierta aislada protege la leche del calor y del frío.*

Entrega a la industria

La leche cruda llega a la industria en cántaras o en cisternas isotermas, siendo estas últimas utilizadas únicamente en combinación con depósitos de enfriamiento en la granja. Los requisitos son los mismos para ambos métodos, es decir, que la leche debe mantenerse bien fria y libre de aire, con un tratamiento mecánico lo más suave posible. Por ejemplo, las cántaras y las cisternas deben estar lo más llenas posible, con objeto de evitar la agitación superficial de la leche en los envases.

Recogida en cántaras

La leche se transporta en cántaras de varios tamaños, siendo las más comunes de 30 a 50 litros de capacidad. Las cántaras se llevan desde la granja hasta la carretera. Esto se debe hacer justo antes de la llegada del camión de recogida. Las cántaras deben protegerse del sol por medio de sombrajes o almacenándolas en lugares cubiertos apropiados (Figura 5.4), o mejor aún utilizando una cubierta aislada de poliestireno, tal como se indica en la Figura 5.3.

Fig. 5.4 *Recogida de cántaras.*

Se deben establecer centros de recogida de leche en ciertas regiones donde no hay carreteras hasta las granjas, cuando no hay agua y/o electricidad en la granja o cuando las cantidades de leche son tan pequeñas que no justifican la inversión en depósitos de enfriamiento. Estos centros pueden organizarse de diversas formas, según las condiciones existentes. Los granjeros tienen varias alternativas. Se puede entregar la leche sin enfriar en cántaras o entregar la leche enfriada en depósitos aislados en ciertos puntos de la carretera directamente a cisternas. También, la leche no enfriada se puede entregar en cántaras a una estación central de enfriamiento, tal como se muestra en la Figura 5.5. Otra alternativa es que los granjeros de varias granjas vecinas entreguen su leche sin enfriar en cántaras a una granja de la zona de mayores dimensiones.

El camión de recogida de las cántaras sigue un plan cuidadosamente establecido para llegar siempre a cada punto de recogida a la misma hora. Después de haber sido cargadas sobre la plataforma del camión, las cántaras deben ser siempre cubiertas para su protección contra el sol y el polvo. El camión vuelve a la industria tan pronto como haya recogido todas las cántaras de su ruta.

Normalmente, cada granja tiene un número de código que se estampa sobre las cántaras. Este número sirve a la industria lechera para pagar a los granjeros.

La leche procedente de vacas enfermas no debe ser suministrada a la central junto con la leche de animales sanos. La leche procedente de ganado tratado con antibióticos se debe mantener separada del resto. Esa leche no puede utilizarse para la elaboración de productos donde se emplean cultivos bacterianos, ya que las cepas de antibióticos matarían a las bacterias. Esto sería de aplicación a los productos lácteos acidificados, queso y mantequilla, etc. Pequeñas cantidades de leche conteniendo antibióticos pueden hacer que enormes cantidades de este mismo producto resulten inadecuadas para el uso al que estaban destinadas.

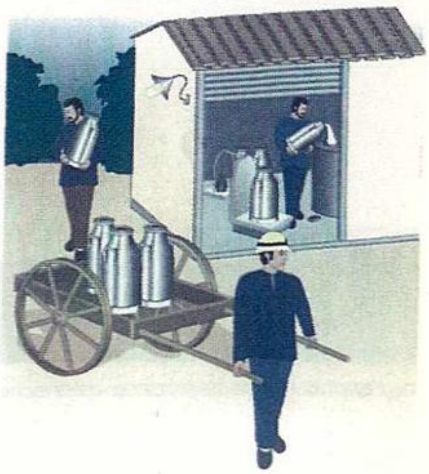


Fig. 5.5 *Los granjeros llevan la leche no enfriada en cántaras a estaciones de recogida y enfriamiento centralizadas.*

Recogida en cisternas

Cuando la leche se recoge en cisternas, debe ser posible la entrada del camión hasta las cercanías de la sala donde está instalado el depósito de leche en la granja. La manguera de carga de la cisterna se conecta a la válvula de salida del tanque de refrigeración de la granja. La cisterna va provista normalmente de un caudalímetro y de una bomba con objeto de registrar automáticamente el volumen. En otros casos, el volumen se mide por diferencias de niveles registradas, que, teniendo en cuenta el tamaño del depósito en cuestión, representan un cierto volumen. En muchos casos, la cisterna va equipada también con un desaireador.

El bombeo se detiene tan pronto como el depósito de enfriamiento se ha vaciado. Esto evita que el aire se mezcle con la leche. La cisterna del camión de recogida está dividida en cierto número de compartimentos, con objeto de evitar que la leche sufra una agitacion fuerte durante el transporte. Se va procediendo al llenado de cada depósito, y cuando la cisterna ha completado su recorrido programado, entrega la leche a la central.

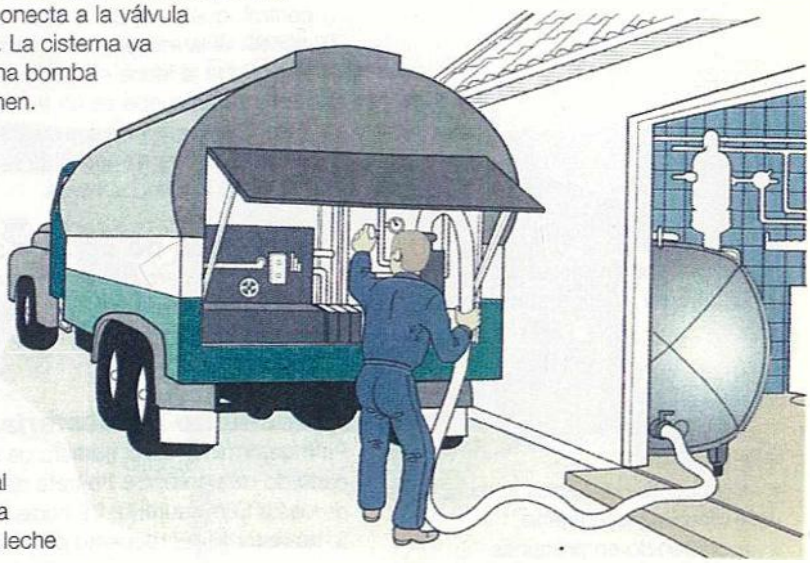


Fig. 5.6 *Recogida de la leche en cisterna en la granja.*

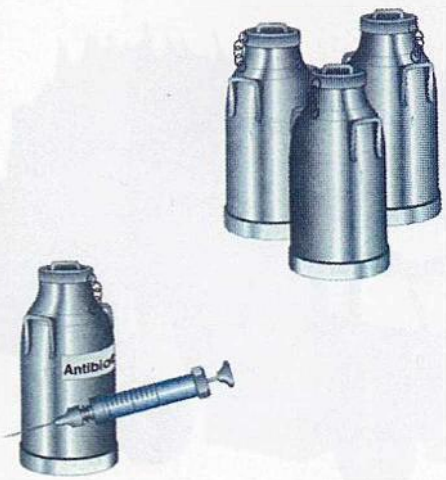


Fig. 5.7 *La leche de los animales tratados con antibióticos se debe mantener separada del resto de la leche.*

Fig. 5.8 *Análisis de muestras de la leche.*

Las pruebas más comunes llevadas a cabo en la leche que se recibe son:

- sabor y olor
- limpieza
- formación de sedimentos
- higiene
- recuento de células somáticas
- recuento bacteriano
- contenido en proteinas
- contenido en grasa
- punto de congelación

Control de calidad de la leche

La leche de animales enfermos y la que contiene antibióticos o sedimentos no debe ser aceptada por la industria. Incluso trazas de antibióticos en la leche pueden hacerla inadecuada para la fabricación de productos que son acidificados por cultivos bacterianos, como es el caso del yogur, queso, etc.

Normalmente, en la granja sólo se efectúa una valoración general de la calidad de la leche. La composición y la calidad higiénica son determinadas por primera vez mediante un cierto número de pruebas a la llegada de la leche a la industria. El resultado de algunas de estas pruebas tiene una influencia directa en el precio que el ganadero recibe por la leche entregada.

A continuación se indican algunas de las pruebas más comunes que se realizan en la industria sobre la leche suministrada.

Sabor y olor

En el caso de la recogida en cisterna, el conductor toma una muestra de la leche en la granja para ser investigada en la industria. De la leche recibida en cántaras se toman muestras en el departamento de recepción de dichos envases. A la leche que presenta olores o sabores distintos de los normales se le asigna un coeficiente de calidad inferior. Esto afecta al pago que se hace al granjero. La leche que presenta desviaciones importantes en cuanto a olor y sabor debe ser rechazada por la industria.

Pruebas de limpieza

Las superficies interiores de los depósitos y cántaras de cada granja deben ser cuidadosamente inspeccionadas. Cualquier residuo presente en la leche indica una limpieza deficiente y puede suponer una reducción en el pago recibido por el ganadero, de acuerdo con un esquema establecido de pago por calidad.

Pruebas de sedimentos

Esto se aplica únicamente a las leches recogidas en cántaras. Se toma una muestra con una pipeta del fondo de la cántara y se pasa a través de un filtro. Si se encuentran impurezas visibles retenidas en el filtro se aplica una reducción en el pago por calidad.

Prueba de higiene o de la resazurina

El contenido bacteriano de la leche es una medida de su calidad higiénica. Las pruebas de la resazurina se utilizan frecuentemente. La resazurina es un colorante azul, que se vuelve incoloro cuando se le reduce químicamente por la eliminación de oxígeno. Cuando se añade a la muestra de leche, la actividad metabólica de las bacterias presentes tiene el efecto de cambiar el color del colorante a una velocidad que está directamente relacionado con el número total de bacterias presentes en dicha muestra

Dos pruebas de higiene utilizan este principio. Una es una prueba rápida de control, que es la base para la eliminación de cántaras con leche en malas condiciones. Si la muestra comienza a cambiar de tonalidad de forma inmediata se considera que la leche en cuestión no es apta para consumo humano.

La otra prueba es un test de rutina que implica el que la muestra sea almacenada en un refrigerador durante la noche, antes de añadir la solución de resazurina. La muestra es entonces incubada en un baño de agua caliente y mantenida a 37.5°C durante dos horas.

Recuento de células somáticas

Un gran número de células somáticas en la leche (más de 500.000 por ml) indica que las vacas sufren alguna enfermedad en las ubres. El contenido celular se determina mediante dispositivos de recuento de partículas especialmente diseñados (contador Coulter, etc.).

Recuento de bacterias

Para determinar el número de bacterias se puede utilizar un procedimiento simplificado de recuento. Se trata del método Leesment, donde las bacterias son incubadas a 30°C durante 72 horas en una muestra de leche de 0.001 ml con un sustrato nutritivo. El recuento de bacterias se realiza por medio de una pantalla especial.

Contenido en proteinas

Muchas industrias pagan la leche a los granjeros según su contenido en proteinas. El análisis de las mismas se hace con instrumentos que operan con rayos infrarrojos. Con dichos instrumentos se pueden realizar hasta 300 análisis por hora.

Contenido en grasa

Se pueden aplicar varios métodos para determinar el contenido en grasa de la leche. El método Gerber es el más utilizado para la leche entera.

Punto de congelación

Muchas industrias comprueban el punto de congelación de la leche con objeto de descubrir si ha sido o no diluida con agua. La leche de composición normal tiene un punto de congelación comprendido entre -0.54 y -0.59°C. El punto de congelación sube si se añade agua a la leche. Se requieren instrumentos especiales para comprobar este punto.

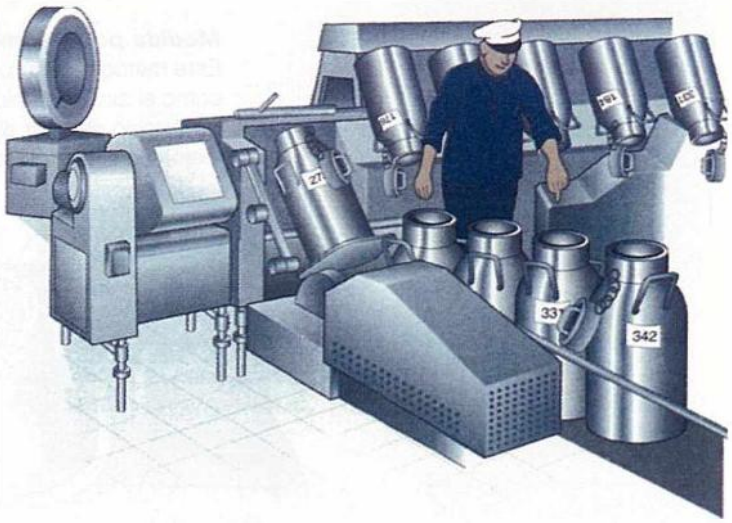


Fig. 5.9 *Recepción de cántaras. Pesado y registro de la leche.*

Recepción de la leche

Las industrias tienen departamentos especiales de recepción para la leche procedente de las granjas. Lo primero que se hace en la recepción es determinar la cantidad de leche recibida. Dicha cantidad se registra en el sistema de pesado que la industria utiliza para comparar después con la cantidad de producción terminada.

La cantidad de leche recibida puede medirse por volumen o por peso.

Recepción en cántaras

La leche que se recibe en cántaras se pesa. Las cántaras pasan del camión a una cinta transportadora. En su camino, las tapas de dichas cántaras son automáticamente separadas. En el punto destinado al pesaje de la leche, ésta se vacía automáticamente en un depósito de pesada que indica la cantidad. El operario que está situado junto a la báscula registra la cantidad recibida junto con la identificación del productor. El sistema de pesaje está diseñado frecuentemente de forma que el operador registra la identificación del producto en un panel, antes de proceder a pesar todas las cántaras de dicho productor (Figura 5.9). Los pesos parciales son después automáticamente totalizados y registrados con la identificación. La identificación del siguiente suministrador es entonces registrada por el operador, y el proceso se repite hasta que toda la leche ha sido pesada.

El equipo utilizado en el pesado de la leche debe ser mantenido y comprobado todos los días con objeto de asegurar su precisión.

Una vez pesada, la leche cruda se bombea hacia los depósitos de almacenamiento a la espera de su posterior tratamiento.

Las cántaras vacías se transportan hacia una instalación de limpieza, donde se lavan con agua y detergente para eliminar cualquier residuo de leche. En algunos casos, las cántaras limpias se llevan a continuación hasta otra instalación donde se llenan con productos lácteos que se utilizarán en alimentación animal en la granja, tales como leche desnatada, nata o suero. Por último, las cántaras pasan a un muelle de carga para esperar su retorno a la granja.

Recepción en cisternas

Las cisternas que llegan a la central entran hasta la sala de recepción, que en ocasiones es lo suficientemente grande como para albergar varios vehículos.

La leche se mide bien por volumen o por peso.

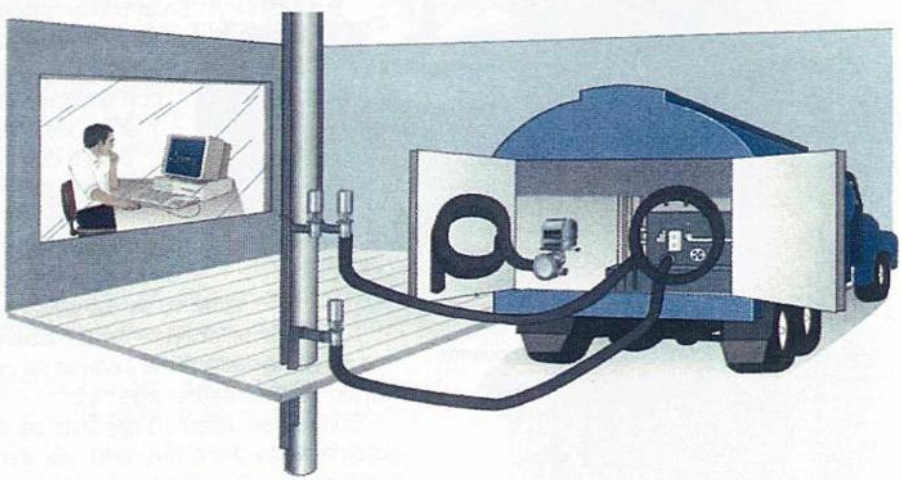


Fig. 5.10 *Medida de la leche que se recibe en la zona de recepción de cisternas.*

Medida por volumen

Este método utiliza un caudalímetro. Este aparato registra tanto el caudal de leche como el aire contenido en la misma, por lo que su resultado no es siempre fiable. Es preciso eliminar el aire que entra con la leche. Por ello, la medida puede ser mejorada si se coloca un eliminador de aire antes del caudalímetro (Figura 5.11).

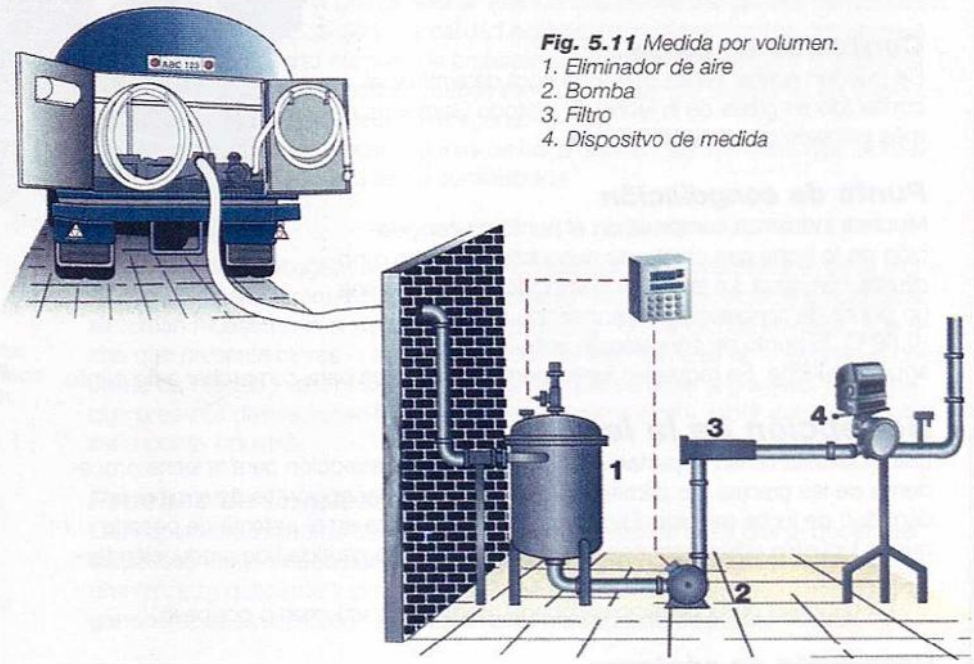


Fig. 5.11 *Medida por volumen.*
1. Eliminador de aire
2. Bomba
3. Filtro
4. Dispositvo de medida

La válvula de salida de la cisterna se conecta al desaireador, y desde aquí la leche (libre de aire) se bombea a través del caudalímetro, que indica de forma continua el flujo total. Cuando toda la leche ha sido descargada se coloca una tarjeta en el medidor para registrar el volumen total que ha pasado.

El arranque de la bomba se produce cuando el equipo de control comprueba que la leche en el desaireador ha alcanzado el nivel prefijado que evita que el aire pase al resto de la línea. La bomba se para en el momento en que el nivel de la leche cae por debajo de cierto nivel.

Después de esta medida, la leche se bombea a los depósitos o silos de almacenamiento.

Medida por peso

El peso de la leche recolectada en cisternas se puede obtener de dos formas:

- pesando la cisterna antes y después de su descarga y restando un valor del otro (Figura 5.12).
- por medio de depósitos especiales de pesado, con células de carga en las patas.

Fig. 5.12 *Cisterna sobre una báscula puente.*

En el primer sistema, la cisterna es conducida hasta una báscula puente de la industria. La operación puede ser manual o automática. Si es manual, el operario registra el peso junto con el código del conductor. Cuando la operación es automática, los datos necesarios se registran cuando el conductor coloca una tarjeta en un lector de tarjetas. Antes de efectuar el pesado de la cisterna, ésta pasa normalmente por una estación de lavado de vehículos. Esto es especialmente importante cuando el clima es malo.

Una vez que se ha registrado el peso bruto de la cisterna, la leche es descargada en la industria. Esto se puede hacer en una línea provista de un desaireador, pero no de un caudalímetro. Cuando se ha vaciado, la cisterna se pesa otra vez y se deduce la tara del peso bruto anteriormente registrado.

Cuando se utiliza un depósito para el pesado, la leche se bombea desde la cisterna hasta dicho depósito, que está provisto de células de carga en sus patas. Estas células dan una señal eléctrica que es siempre proporcional al peso del depósito. La intensidad de la señal aumenta al hacerlo el peso del depósito conforme la leche entra en el mismo. Cuando toda la leche ha entrado en dicho depósito se

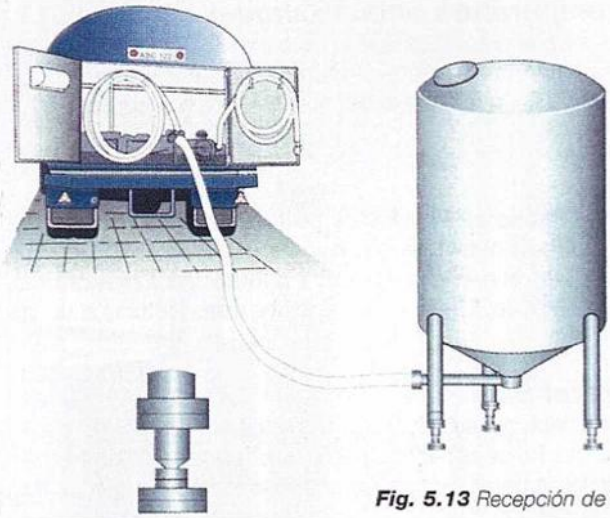


Fig. 5.13 *Recepción de leche via tanque de pesado.*

procede al registro del peso. Una vez efectuada esta operación, la leche se bombea a los tanques de almacenamiento (silos).

Limpieza de la cisterna

Las cisternas se lavan diariamente, como regla después de la jornada de recogida. Si la cisterna hace varias recogidas al día, debe lavarse después de cada una de ellas. Su limpieza puede efectuarse conectando la cisterna a un sistema de limpieza mientras se encuentra en el área de recepción o conduciéndola hasta una estación especial de lavado.

Muchas industrias lavan también la parte externa de sus cisternas todos los días, con objeto de que siempre aparezcan limpias cuando están en la carretera.

Enfriamiento de la leche recibida

Durante el transporte de la leche es inevitable un incremento ligero de la temperatura por encima de +4°C. Por ello, la leche es normalmente enfriada por debajo de +4°C en un intercambiador de calor de placas, antes de almacenarse en los tanques silo de almacenamiento.

Almacenamiento de la leche cruda

La leche cruda sin tratar (leche entera) se almacena en grandes depósitos verticales (tanques silo) que tienen una capacidad de 25.000 a 150.000 litros. Normalmente, las capacidades oscilan entre 50.000 y 100.000 litros. Los depósitos de menores dimensiones se encuentran frecuentemente dentro de los edificios, mientras que los depósitos de mayores dimensiones se colocan fuera de éstos, con objeto de reducir costes en la construcción de los edificios. Los depósitos situados a la intemperie tienen una doble pared, con un aislamiento entre ambas paredes. Los depósitos interiores son de acero inoxidable pulido en su cara interna, siendo su parte exterior una lámina metálica soldada o de acero inoxidable.

Agitación en los depósitos de almacenamiento

Estos grandes depósitos deben disponer de algún sistema de agitación para evitar la separación de la nata por gravedad. La agitación debe ser muy suave. La agitación violenta da lugar a la aireación de la leche y a la desintegración de los glóbulos de grasa. Ello expone la grasa a ataques de las enzimas lipásicas de la leche. Por lo tanto, la agitación suave es una de las reglas básicas en el tratamiento de la leche. El depósito que se ve en la Figura 5.14 tiene un agitador de hélice, que se utiliza con buenos resultados en tanques silo. En depósitos de gran altura puede ser necesaria la utilización de dos agitadores colocados a distintos niveles, con objeto de conseguir el efecto deseado.

Los depósitos colocados a la intemperie van provistos de una caseta para el equipo auxiliar. Los paneles de control de los tanques se sitúan en una estación central de control cubierta.

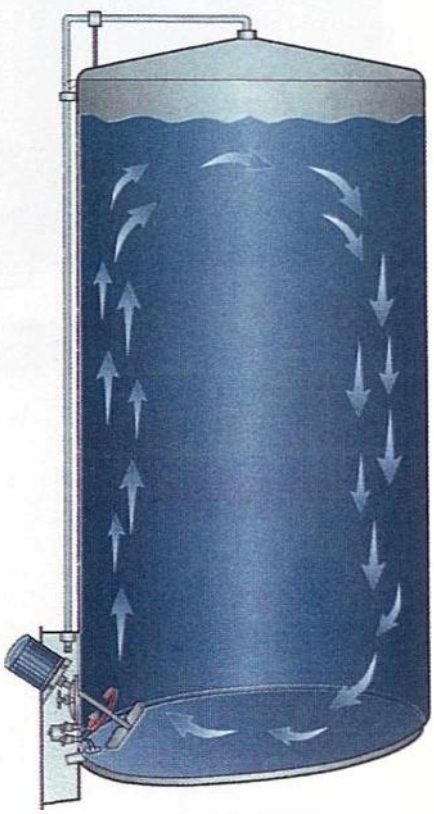


Fig. 5.14 *Tanque silo con agitador de paletas.*

Indicación de temperatura en los tanques

La temperatura en los silos aparece indicada en el panel de control del tanque. Normalmente se utiliza un termómetro ordinario, pero cada vez es más corriente utilizar un transmisor eléctrico, que envía la señal a una estación central de monitorización.

Indicador de nivel

Hay varios métodos disponibles para la medida del nivel de la leche en los depósitos. El indicador neumático de nivel mide la presión estática que se corresponde con la columna de líquido en el depósito. Cuanto mayor es dicha presión, mayor es el nivel de llenado del tanque. El indicador transmite estas lecturas a un instrumento.

Protección de nivel bajo

La agitación de la leche debe ser suave. Por lo tanto, dicho agitador no debe empezar su trabajo hasta que no se encuentra cubierto por la leche. Con frecuencia, se coloca un electrodo en la pared del tanque al nivel del depósito que se requiere para el comienzo de la agitación. El agitador se detiene si el nivel en el depósito cae por debajo del electrodo. Este electrodo es conocido como indicador de nivel bajo (LL).

Protección contra el rebose del depósito

Un electrodo de nivel alto (HL) se coloca en la parte superior del depósito con objeto de evitar reboses del mismo por sobrellenado. Este electrodo cierra la válvula de entrada cuando el depósito está lleno y el suministro de leche pasa a otro depósito.

Indicación de tanque vacío

Durante la operación de vaciado de los depósitos es importante conocer cuándo éstos se quedan vacíos, ya que la leche que se quedara en el depósito cuando se hubiese cerrado la válvula de salida se perdería con las soluciones de limpieza utilizadas a continuación. Además, existe el riesgo de succionar aire en la línea si continúa el vaciado cuando el depósito ya no tiene leche. Esto supone una interferencia en los tratamientos posteriores. Por ello se coloca un electrodo, de nivel mínimo (LLL, lowest low level) en la línea de drenaje, para detectar cuándo la última leche abandona el depósito. Esta señal se utiliza para vaciar un depósito contiguo o para detener la operación.

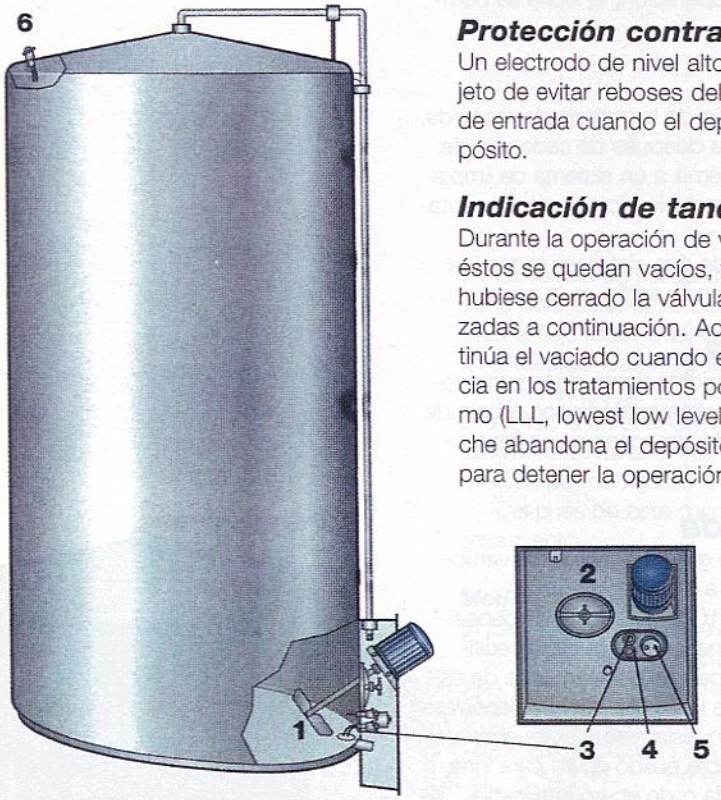
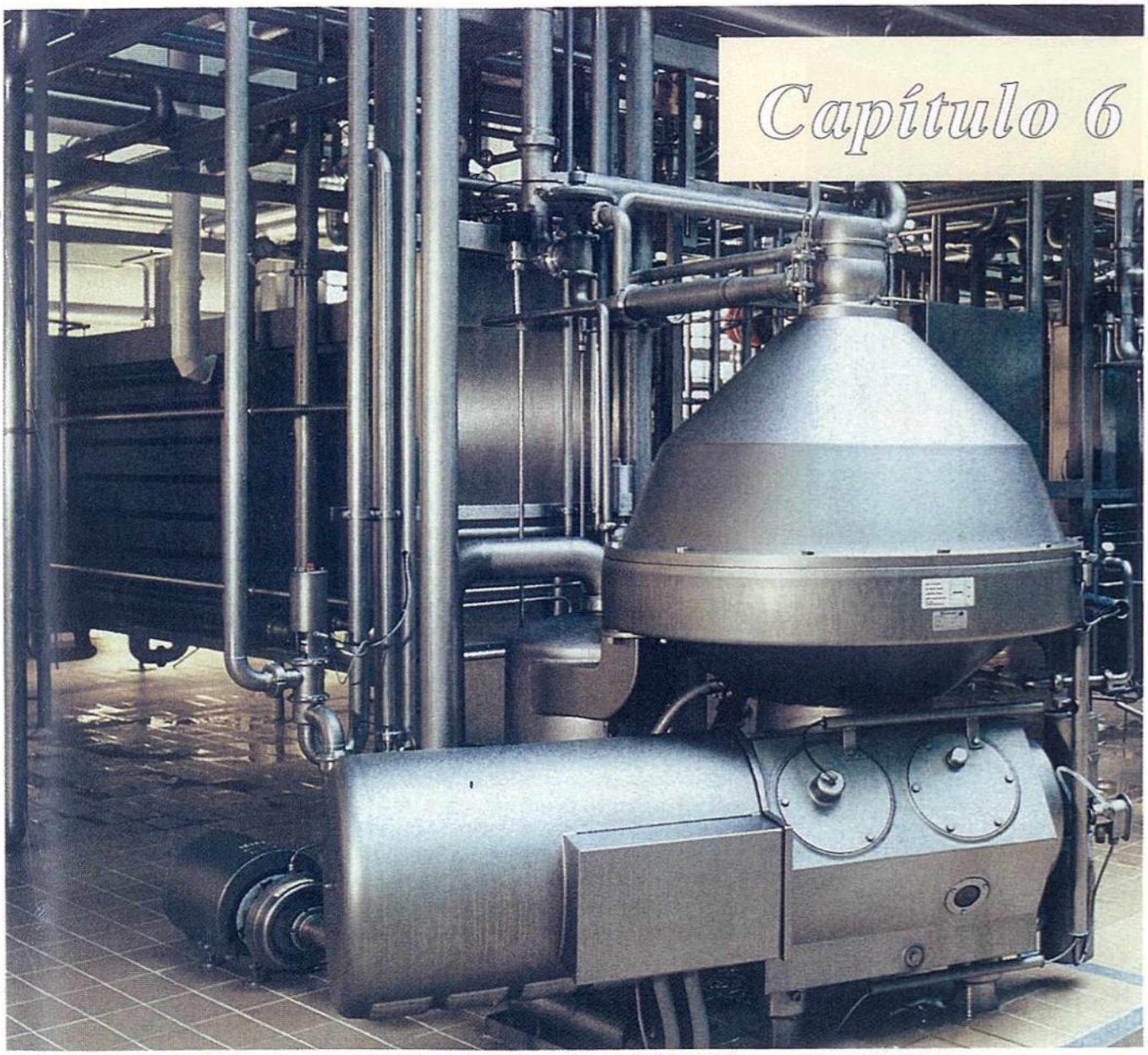


Fig. 5.15 *Tanque silo con armario que alberga boca de hombre, indicadores, etc.*
1 Agitador
2 Boca de hombre
3 Indicador de temperatura
4 Electrodo de nivel bajo
5 Indicador de nivel neumático
6 Electrodo de nivel alto

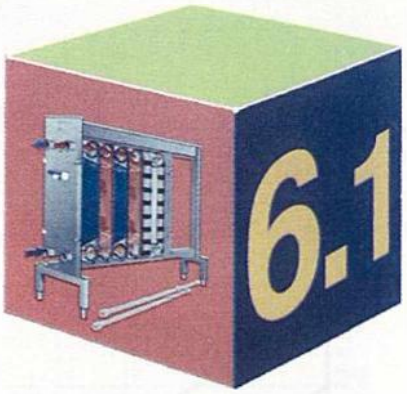


Capítulo 6

Bloques que integran los sistemas de procesado de la leche

El siguiente capítulo describe los componentes frecuentemente utilizados en el procesado de la leche. En este capítulo se tratarán sólo aquellos componentes que se utilizan en el procesado de la leche líquida. Los equipos de fabricación de queso, mantequilla, etc., se describen en los siguientes capítulos al mismo tiempo que se describen los respectivos procesos.

Intercambiadores de calor



Objetivos del tratamiento térmico

Al final del siglo XIX, el tratamiento térmico de la leche era ya algo habitual, de tal forma que la mayoría de las industrias lácteas realizaban el calentamiento de la leche por una u otra razón, como por ejemplo para fabricar queso y mantequilla.

Antes de la introducción del tratamiento térmico, la leche era una fuente de infecciones, ya que es un medio perfecto para los microorganismos. Algunas enfermedades como la tuberculosis y el tifus eran muchas veces transmitidas por la leche.

El término "pasteurización" conmemora a Louis Pasteur, quien a mediados del siglo XIX realizó estudios sobre los fundamentos del efecto letal del calor sobre los microorganismos y el uso del tratamiento térmico como técnica de conservación. La pasteurización de la leche es un tipo especial de tratamiento térmico que se puede definir como "cualquier tratamiento térmico de la leche que asegura la destrucción del bacilo de la tuberculosis (B.T.) sin afectar de manera importante a las propiedades físicas y químicas".

Si se considera la historia de la pasteurización hay que decir que aunque los científicos en todas partes estaban de acuerdo en que era necesario un cierto grado de tratamiento térmico, el tratamiento fue deficientemente controlado en la práctica comercial durante largo tiempo. La leche era normalmente sobrecalentada o infracalentada. De esta forma la leche presentaba con cierta frecuencia problemas de sabor a cocido o contenía B.T. viables.

A mediados de los años 1930 (JDR: 6/191) Kay y Graham anunciaron la detección del enzima *fosfatasa*. Este enzima está siempre presente en la leche cruda y se destruye mediante una combinación tiempo/temperatura que es la adecuada para conseguir una pasteurización eficiente. Además, su presencia o ausencia se determina fácilmente (mediante el test de la fosfatasa de Scharer). La ausencia de la fosfatasa indica que se ha tratado adecuadamente la leche.

Es realmente una suerte que ninguno de los patógenos más importantes formen esporas en la leche.

Afortunadamente, todos los organismos patógenos comunes en la leche son destruidos mediante un tratamiento térmico no muy intenso que tendrá un efecto muy bajo sobre las propiedades físicas y químicas de la leche. El organismo más resistente es el bacilo de la tuberculosis (B.T.), que se puede destruir mediante calentamiento de la leche a 63°C durante 10 minutos. La completa seguridad se puede conseguir mediante calentamiento de la leche a 63°C durante 30 minutos. El B.T. es considerado como el organismo de referencia en la pasteurización: cualquier tratamiento que destruya el B.T. se supone que destruye a todos los demás patógenos de la leche.

Además de los citados microorganismos patógenos, la leche también contiene otras sustancias y otros microorganismos que pueden estropear su sabor o acortar la vida útil de los productos lácteos. Por lo anterior, un fin secundario que se consigue con la pasterización es la destrucción de tantos organismos como sea posible, así como de los sistemas enzimáticos con objeto de salvaguardar la calidad del producto. Para ello se necesita un tratamiento térmico más intenso que el requerido para destruir las bacterias patógenas.

Este segundo fin que nos proporciona el tratamiento térmico es en la actualidad cada vez más importante, conforme las industrias lácteas son de dimensiones mayores y menos numerosas. Los intervalos más prolongados entre las entregas, a pesar de las modernas técnicas de enfriamiento, hacen que los microorganis-

mos dispongan de más tiempo para multiplicarse y desarrollar sus sistemas enzimáticos. Además, los componentes de la leche son degradados, baja el pH, etc. Para superar todos estos problemas, el tratamiento térmico debe aplicarse lo más rápidamente posible después de que la leche ha llegado a la central lechera.

Combinación tiempo/temperatura

La combinación de temperatura y tiempo de mantenimiento es muy importante, ya que determina la intensidad del tratamiento térmico. La figura 6.1.1 muestra las curvas de tratamiento térmico con efectos letales sobre las *bacterias Coliformes*, *bacterias del Tifus* y sobre el *bacilo de la Tuberculosis*. Según estas curvas, las bacterias coli presentes en la leche mueren cuando son calentadas a 70ºC y mantenidas a esta temperatura durante 1 segundo. A la temperatura de 65ºC se necesita un tiempo de mantenimiento de 10 segundos para conseguir el mismo efecto. Estas dos combinaciones, 70ºC/1 s y 65ºC/10 s tienen, por lo tanto, el mismo efecto letal.

Los bacilos de la tuberculosis son más resistentes al tratamiento térmico que las bacterias coli. Se necesita un tiempo de mantenimiento de 20 segundos a una temperatura de 70ºC ó unos 2 minutos a 65ºC para asegurar su total destrucción. Puede ocurrir que también sean resistentes al calor los micrococos de la leche. Pero, normalmente son completamente inocuos.

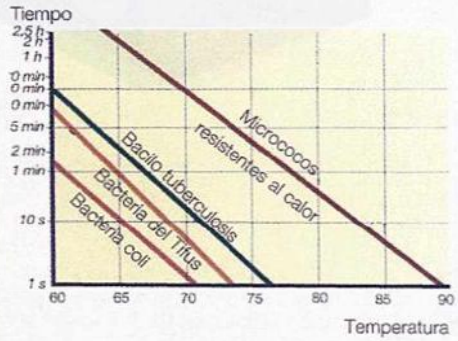


Fig. 6.1.1 *Efecto letal sobre las bacterias.*

Factores limitantes del tratamiento térmico

El tratarniento térmico fuerte de la leche es deseable desde el punto de vista microbiológico. Sin embargo, ello supone aumentar el riesgo de aparición de defectos en el sabor, valor nutritivo y apariencia de la leche. Las proteinas presentes en la leche son desnaturalizadas a altas temperaturas. Esto significa que las propiedades para la elaboración de queso a partir de la leche son dañadas de forma drástica por un tratamiento térmico intensivo. Un calentamiento fuerte produce cambios en el sabor (en primer lugar se origina el sabor a cocido y después el sabor a quemado). La elección de la combinación tiempo/temperatura debe ser optimizada para conseguir un efecto adecuado tanto desde el punto de vista microbiológico como desde el punto de vista de la calidad.

Como el tratamiento térmico de la leche es la parte más importante del procesado de la misma, y cada vez se conoce mejor su influencia sobre la calidad de la leche, es interesante analizar las diferentes categorías establecidas de tratamiento térmico (ver Tabla 6.1.1).

Tabla 6.1.1
Principales categorías de tratamientos térmicos en la industria láctea.

Proceso	Temperatura	Tiempo
Termización	63 - 65°C	15 s
Pasteurización LTLT	63°C	30 min
Pasteurización HTST de la leche	72 -75 °C	15 - 20 s
Pasteurización HTST de la nata, etc.	<80°C	1 - 5 s
Ultra pasteurización	125 - 138°C	2 - 4 s
Esterilización UHT	135 - 140°C	unos pocos segundos
Esterilización en el envase	115 - 120°C	20 -30 min

Termización

En muchas centrales lecheras de gran tamaño no es posible pasteurizar y procesar toda la leche inmediatamente después de la recepción. Parte de la leche debe almacenarse en tanques silo durante horas o días. Bajo estas condiciones, incluso un enfriamiento intenso no es suficiente para prevenir serios deterioros de la calidad.

Muchas industrias entonces precalientan la leche hasta una temperatura inferior a la de pasteurización para inhibir eventualmente el crecimiento bacteriano. Este proceso se denomina termización. La leche se calienta a 63-65ºC durante 15 segundos, una combinación tiempo/temperatura que no inactiva la enzima fosfatasa. La doble pasteurización está prohibida por la ley en muchos paises, ya que la termización no debe sustituir las condiciones de pasteurización.

Para prevenir que las bacterias aerobias formadoras de esporas se multipliquen tras la termización, la leche debe ser rapidamente enfriada hasta 4ºC o a una temperatura inferior, y no se debe mezclar con leche cruda no tratada. Muchos expertos opinan que la termización tiene un efecto favorable sobre ciertas bacterias formadoras de esporas. El tratamiento térmico provoca que muchas esporas retornen a la forma vegetativa, lo que implica que serían destruidas mediante un tratamiento de pasteurización posterior de la leche.

La termización debe de aplicarse solamente en casos excepcionales. El objetivo debe ser pasteurizar toda la leche que entra en la industria dentro de las 24 horas desde su recepción.

Pasteurización LTLT

Al principio el tratamiento de la leche se realizaba de manera discontínua, de forma que la leche se calentaba hasta 63ºC en envases abiertos y se mantenía a esta temperatura durante 30 minutos. Este método se denomina *método discontínuo o método de baja temperatura*, largo tiempo (LTLT, del inglés *low temperature, long time*).

Actualmente, la leche es casi siempre tratada por calor en proceso contínuo mediante la termización, pasteurización HTST o tratamiento UHT.

Pasteurización HTST

HTST es la abreviatura del inglés *High Temperature Short Time* (temperatura alta-tiempo corto). La combinación de tiempo/temperatura, aplicada en cada caso, varía según la calidad de la leche cruda, el tipo de producto tratado y las propiedades del mismo.

Leche

El procesado HTST de la leche implica su calentamiento hasta 72-75ºC con un tiempo de mantenimiento de 15-20 segundos antes de proceder a su enfriamiento. La enzima fosfatasa es destruida por esta combinacion de tiempo y temperatura. Por ello, la prueba de la fosfatasa se utiliza para comprobar si la leche ha sido correctamente pasterizada. El resultado de la prueba debe ser negativo, ya que no debe existir actividad detectable de la fosfatasa. (Ver la Figura 6.1.2).

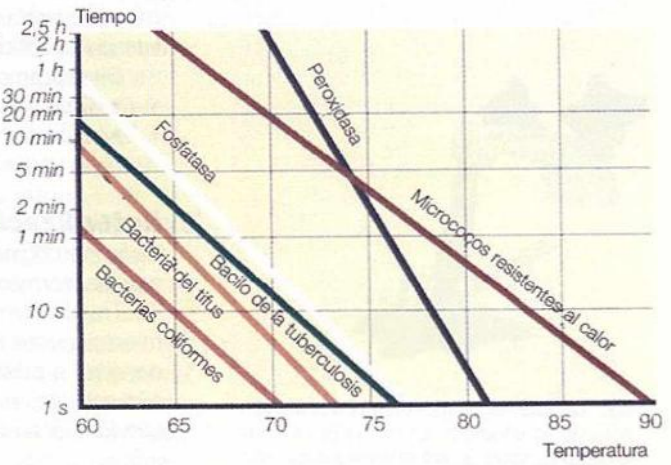


Fig. 6.1.2 *Curvas de efecto letal y curvas tiempo/temperatura de destrucción de algunos enzimas y microorganismos.*

Nata y productos fermentados

El test de la *fosfatasa* no puede ser utilizado en productos con contenidos de grasa por encima del 8%, ya que tiene lugar una cierta reactivación de la enzima después de efectuada la pasteurización. Además, el tratamiento térmico debe ser más fuerte, ya que la grasa es un mal conductor del calor.

La *peroxidasa*, otra enzima, se utiliza para comprobar los resultados de la pasteurización en la nata (test de la peroxidasa de Storch). El producto se calienta a una temperatura superior a 80ºC, con un tiempo de mantenimiento de unos 5 segundos. Este tratamiento térmico más intenso es suficiente para inactivar la peroxidasa. La prueba debe ser negativa, ya que no debe existir actividad detectable de la peroxidasa en el producto. Ver la Figura 6.1.2.

Como el test de la fosfatasa no se puede utilizar en productos acidificados, el control del calentamiento se basa en la enzima peroxidasa. La leche destinada a la producción de productos lácteos fermentados es normalmente objeto de un calentamiento intenso para coagular las proteinas del suero y mantener las propiedades de absorción de agua (de esta forma se evita la formación de suero).

Ultra pasteurización

La ultra pasteurización se puede utilizar cuando se necesita conseguir una determinada vida útil. Para algunas industrias conseguir dos días extras es suficiente, mientras que otras tratan de conseguir 30-40 días además de los 2-16 dias que tradicionalmente se asocian a los productos pasteurizados. El principio fundamental es reducir las principales causas de reinfección del producto durante el procesado y el envasado con el fin de extender la vida útil del producto. Esto requiere niveles extremadamente altos de higiene de producción y una temperatura de distribución de no más de 7ºC. Cuanto más baja es la temperatura mayor será la vida útil.

La base de la ampliación de la vida útil es el calentamiento de la leche a 125-138°C durante 2-4 segundos y su enfriamiento a menos de 7°C. Generalmente, se utiliza el término Vida Util Ampliada (VUA, en inglés ESL = *Extended Shelf Life*) para los productos tratados por calor que han sido mejorados en cuanto al mantenimiento de su calidad por uno u otro método. En cualquier caso, los productos VUA se deben de mantener refrigerados durante la distribución y venta al detalle.

Tratamiento UHT

UHT es la abreviatura en inglés de *Ultra High Temperature* (temperatura ultra elevada). El tratamiento UHT es una técnica aplicada para la conservación de productos alimenticios líquidos, por exposición de los mismos a un breve pero intenso calentamiento, a temperaturas que suelen oscilar entre los 135 y 140°C. De esta forma se destruyen los microorganismos que podrían estropear los productos alimenticios.

El tratamiento UHT es un proceso continuo que se desarrolla en un sistema cerrado, que impide que el producto se contamine por microorganismos presentes en el ambiente. El producto en cuestión pasa a través de etapas de calentamiento y enfriamiento, en rápida sucesión. Una parte integral del proceso es el envasado aséptico, que elimina los riesgos de reinfección del producto.

Se utilizan dos métodos alternativos de tratamiento UHT:

- Calentamiento indirecto y enfriamiento en intercambiadores de calor.
- Calentamiento directo por medio de inyección de vapor o infusión de leche en vapor y enfriamiento por expansión bajo vacío.

Esterilización

La forma original de esterilización, aún utilizada, consiste en la esterilización en el envase, normalmente a 115-120°C durante unos 20-30 minutos.

Tras la normalización del contenido en grasa, la homogeneización y calentamiento a unos 80°C, la leche se envasa en envases limpios -normalmente botellas de vidrio o plástico para leche líquida, y latas para leche evaporada. El producto, aún caliente, se transfiere a los autoclaves discontínuos o a una torre hidrostática con funcionamiento contínuo.

Las operaciones de calentamiento y enfriamiento son las más importantes en una industria láctea.

Precalentamiento

Normalmente, las temperaturas deseadas de proceso se alcanzan directamente tras la pasteurización, pero a veces es necesario enfriar y almacenar la leche temporalmente, antes de que se realice el procesado final. A continuación se dan algunos ejemplos.

Procesos de transferencia de calor en la industria láctea

Uno de los requisitos más importantes en una moderna industria láctea es la capacidad de controlar la temperatura de los productos en cada etapa de su procesado. Los calentamientos y enfriamientos son operaciones muy corrientes en las centrales.

Calentamiento

La leche se calienta utilizando un medio de calentamiento como vapor a baja presión (muy raramente utilizado actualmente) o agua caliente. Una cierta cantidad de calor pasa del medio calefactor a la leche, de forma que la temperatura de esta última aumenta y la temperatura del medio calefactor cae.

Enfriamiento

Inmediatamente después de la llegada a la central, la leche se enfría normalmente hasta una temperatura suficientemente baja, 5°C o menos, para prevenir durante algún tiempo el crecimiento de microorganismos. También, después de la pasteurización la leche se enfría hasta una temperatura suficientemente baja, alrededor de 4°C.

Si se dispone de agua fría natural, se puede utilizar directamente para preenfriar tras la pasteurización y el intercambio de calor regenerativo. En cualquier caso el calor se transfiere de la leche al medio de enfriamiento. La temperatura de la leche se reduce al valor deseado, al mismo tiempo que el medio de enfriamiento se calienta. El medio de enfriamiento puede ser agua fría, agua helada, solución salina o una solución alcohólica (agua glicolada).

Calentamiento y enfriamiento regenerativos

En determinados procesos es preciso calentar un producto para después enfriarlo. El tratamiento de la leche es un ejemplo apropiado. La leche fria es calentada desde unos 4°C hasta la temperatura de pasteurización (72°C), que se mantiene durante 15 segundos para después proceder a un enfriamiento hasta unos 4°C.

El calor de la leche pasteurizada se utiliza para calentar la leche fría. La leche que entra se precalienta utilizando la leche caliente que sale, que es al mismo tiempo preenfriada. Esto ahorra energía de calentamiento y refrigeración. El proceso tiene lugar en un intercambiador de calor y se denomina intercambio de calor regenerativo o, más comúnmente, recuperación de calor. Se puede recuperar de este modo hasta el 94-95% del contenido calorífico de la leche pasteurizada.

Fig. 6.1.3 *Transferencia de calor por conducción. Ejemplo: El calor se transfiere desde la cucharilla hasta el mango.*

Teoría de la transferencia de calor

Para que se produzca transferencia de calor de una sustancia a otra deben de tener temperaturas distintas. El calor siempre fluye del producto más caliente hacia el más frío. El flujo de calor es siempre más rápido cuanto mayor es la diferencia de temperaturas. Durante el proceso de transferencia térmica, la diferencia de temperaturas se reduce gradualmente y la velocidad de flujo de calor va disminuyendo, cesando completamente cuando se igualan dichas temperaturas.

El calor puede ser transmitido de tres maneras: por conducción, por convección y por radiación.

- La ***conducción*** implica una transferencia de energía térmica a través de cuerpos sólidos y de capas de liquido en reposo (sin flujo físico o mezcla en la dirección de la transferencia de calor). En la Figura 6.1.4 se muestra un ejemplo de conducción de calor hacia la cuchara en una taza de café caliente. El calor se transmite desde el café a la cuchara y por conducción hasta la manecilla de la misma lo que hace que se caliente.
- La ***convección*** es una forma de transmisión de calor que se produce cuando partículas de alto contenido térmico se mezclan con partículas frias, transfiriendo su calor a estas últimas por conducción (Figura 6.1.4). Por ello, la convección implica una mezcla de los productos. Si la cucharilla de café se lava con agua fría del grifo, el calor pasa de la citada cucharilla al agua, que se calienta de esta forma. El agua calentada es reemplazada por agua fria, que a su vez absorbe calor otra vez de la cucharilla. La transferencia de calor por convección continúa hasta que la cuchara y el agua que cae tengan la misma temperatura.
- La ***radiación*** es la emisión de calor por un cuerpo que ha acumulado energia térmica (Figura 6.1.5). Dicha energia térmica se convierte en energia radiante, que es emitida por el cuerpo y absorbida por otros cuerpos cercanos. Casi todas las sustancias emiten energia radiante.

Fig. 6.1.4 *Transferencia de calor por convección. Ejemplo: La cucharilla se enjuaga con agua corriente fría. El calor es absorbido por el agua y la cucharilla se enfria hasta que la chucharilla y el agua tienen la misma temperatura.*

Principios de la transferencia de calor

La transferencia de calor en las industrias lácteas tiene lugar por convección y por conducción. Dos principios diferentes son utilizados: calentamiento directo y calentamiento indirecto.

Calentamiento directo

El calentamiento directo implica que el medio de calentamiento se mezcla con el producto.

Esta técnica es utilizada:

- Para calentar agua. El vapor se inyecta directamente en el agua y transfiere calor a la misma, tanto por convección como por conducción.
- Para calentar productos tales como cuajada en la fabricación de ciertos tipos de queso (mezclando el agua caliente con la cuajada) y para esterilizar leche por el método directo (inyeccion de vapor o infusión de la leche en vapor).

El método directo de transferencia de calor es eficaz en los calentamientos rápidos. Ofrece ciertas ventajas, que serán consideradas en el Capítulo 9 sobre la producción de leche de larga vida útil. Sin embargo, supone la mezcla del producto con el medio de calentamiento, lo que significa tomar ciertas precauciones en el proceso posterior. También es necesario disponer de un medio de calentamiento de alta calidad. El calentamiento directo está prohibido por la legislación de algunos paises, por el hecho de que puede introducir sustancias extrañas en el producto.

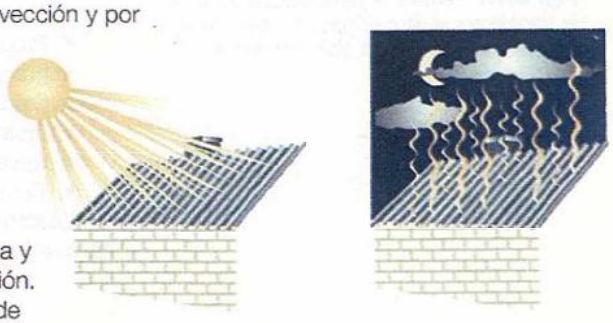


Fig. 6.1.5 *Transferencia de calor por radiación. Ejemplo: La cubierta de una casa acumula calor del sol durante el día y lo irradia durante la noche.*

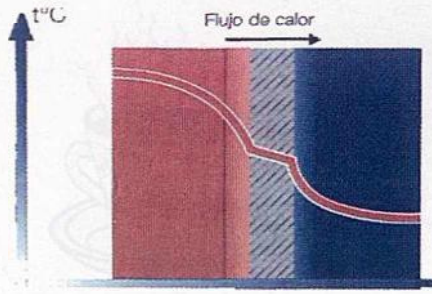


Fig. 6.1.6 *El calor se transfiere desde el medio caliente hasta el producto frío que circula por el otro lado de la pared de intercambio.*

Calentamiento indirecto

Por lo anterior el método indirecto de transferencia de calor es el más utilizado en las industrias lácteas. En este método, el producto y el medio calefactor o refrigerante están separados y no entran en contacto directo. El calor se transfiere desde el medio calefactor al producto a través de una pared (Figura 6.1.6).

Se supone que el medio de calentamiento es agua caliente, que circula por un lado de la pared, y por el otro lado circula leche fría. La pared está caliente por el lado del medio calefactor y fria por el lado del producto. En un intercambiador de calor de placas, éstas constituyen la pared.

Hay una capa límite a cada lado de la pared. La velocidad de los liquidos es frenada por fricción hasta ser casi cero en esas capas limites en contacto con la pared. La capa inmediatamente exterior a la capa limite sólo se ve frenada por esta última y tiene, por lo tanto, una cierta velocidad, aunque baja. La velocidad va aumentando progresivamente en las siguientes capas, hasta ser máxima en el centro del canal o tubería.

Igualmente, la temperatura del agua caliente es máxima en mitad del canal. Cuanto más cerca está el agua de la pared divisoria, más es enfriada por la leche fría que se encuentra en el otro lado. El calor se transmite por convección y por conducción hacia la capa limite. La transferencia de calor entre ambas capas limites separadas por la pared se produce por conducción en su mayor parte, mientras que la transmisión a otras capas de leche en la zona central del canal se hace tanto por conducción como por convección.

El intercambiador de calor

Para transferir calor por el método indirecto se utilizan los intercambiadores de calor.

Diferentes tipos de intercambiadores serán descritos más adelante. Es posible simplificar la transferencia térmica, representando el intercambiador de calor de forma simbólica como dos canales separados por una pared tubular.

El agua caliente (rojo) fluye a través de un canal y la leche (azul) a través del otro. El calor es transferido a través de la pared. El agua caliente entra en el canal a la temperatura t_{i2} y se enfría hasta la temperatura t_{o2} de salida. La leche entra en el citado intercambiador a una temperatura t_{i1} y es calentada por el agua hasta salir a la temperatura t_{o1}. Los cambios de temperatura durante el paso a través del intercambiador se muestran mediante curvas en la Figura 6.1.7.

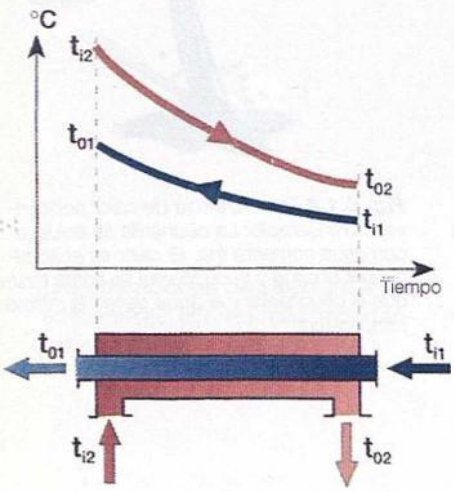


Fig. 6.1.7 *Perfiles de temperatura durante la transferencia de calor en un intercambiador de calor con flujo a contracorriente.*

Datos necesarios para el dimensionado de un intercambiador de calor

El tamaño y la configuración o solución de un intercambiador de calor dependen de muchos factores. Los cálculos pueden ser muy complejos por lo que actualmente normalmente se realizan con la ayuda de un ordenador. Los factores que han de ser considerados son:

- Velocidad de flujo o caudal del producto
- Propiedades físicas de los líquidos
- Programa de temperaturas
- Caidas de presión admisibles
- Diseño del intercambiador de calor
- Necesidades de limpieza
- Tiempos de funcionamiento necesarios

La fórmula general utilizada para el cálculo del tamaño (area de transferencia de calor) de un intercambiador de calor es:

$$A = \frac{V \times \rho \times c_p \times \Delta t}{\Delta t_m \times k}$$

A = area de transferencia de calor requerida
V = caudal de producto
ρ = densidad del producto
c_p = calor específico del producto
Δt = cambio de temperatura del producto
Δt_m = diferencia de temperaturas media logarítmica (DTML)
k = coficiente global de transmisión de calor

Caudal de producto

La velocidad de flujo o caudal, V, viene determinada por el plan de trabajo o capacidad de trabajo establecido en la industria láctea. Cuanto mayor es el caudal a procesar mayor será el intercambiador de calor que se necesite.

Ejemplo: Si el caudal de trabajo de una planta se incrementa de 10000 l/h a 20000 l/h, el intercambiador de calor debe de ampliarse hasta el doble del tamaño original, ya que los caudales se han doblado, manteniéndose constantes el resto de factores que influyen sobre el tamaño.

Propiedades físicas de los líquidos

El valor de la densidad, ρ, viene determinado por la naturaleza del producto.

El valor del calor específico, c_p, viene también determinado por el producto. El calor específico indica la cantidad de calor que se le ha de suministrar al producto para incrementar su temperatura en 1°C.

Otra propiedad física importante es la viscosidad. Esta será discutida en la sección del coeficiente global de transmisión de calor que se discute más abajo.

Programa de temperaturas

El objeto de la transferencia de calor es calentar o enfriar una cantidad dada de producto, tal como la leche, desde una temperatura dada de entrada hasta una temperatura establecida de salida. Esto se consigue en un intercambiador de calor con la ayuda de un medio caloportador, como el agua. En el caso del calentamiento, la leche se calienta con agua caliente, cuya temperatura desciende.

Se deben de considerar diferentes aspectos del programa de temperaturas: el cambio de temperaturas, la temperatura diferencial entre los líquidos y la dirección de flujo de los líquidos que intercambian calor.

Cambio de temperatura

Las temperaturas de entrada y salida del producto son determinadas por las etapas de proceso anterior y posterior. El cambio de la temperatura del producto viene indicada como Δt en la fórmula general que se ha visto anteriormente. Este cambio de temperatura se puede expresar como: $\Delta t_1 = t_{o1} - t_{i1}$. Ver también la Figura 6.1.7.

La temperatura de entrada del fluido caloportador viene determinada por las condiciones de proceso. La temperatura de salida del fluido caloportador puede ser calculada mediante un balance de energía.

En un intercambiador de calor moderno las pérdidas de energía hacia el aire de los alrededores pueden ser despreciadas, ya que son muy pequeñas. Por lo anterior, la energía dada por el líquido caliente será igual a la energía absorbida por el líquido frío, de acuerdo con el correspondiente balance de energía. Este calor se puede expresar mediante la fórmula:

$$V_1 \times \rho_1 \times c_{p1} \times \Delta t_1 = V_2 \times \rho_2 \times c_{p2} \times \Delta t_2$$

Ejemplo: 20000 l/h de leche para fabricación de queso (V_1) se ha de calentar desde 4°C hasta 34°C por medio de 30000 l/h de agua caliente (V_2) a 50°C. La densidad (ρ) y el calor específico (c_p) de la leche será de 1020 kg/m^3 y 3.95 kJ/kg.K y para el agua 990 (a 50°C) y 4.18.

El cambio de temperatura para el agua caliente se calculará entonces como:

$20000 \times 1020 \times 3.95 \times (34 - 4) = 30000 \times 990 \times 4.18 \times \Delta t_2$

$\Delta t_2 = 19.5$°C. La temperatura del agua caliente caerá 19.5°C, desde 50 hasta 30.5°C.

Diferencia de temperatura media logarítmica (DTML)

Ya se ha comentado anteriormente que existe una diferencia entre las temperaturas de los dos líquidos que intercambian calor. La diferencia de temperaturas es la fuerza impulsora. Cuanto mayor es la diferencia de temperaturas, mayor es la velocidad de transferencia de calor y más pequeña es la superficie de intercambio necesaria. En productos sensibles al calor se tienen, sin embargo, límites en esa diferencia de temperaturas.

La diferencia de temperaturas puede variar a través del intercambiador de calor. A efectos de cálculo se utiliza un valor medio para esa diferencia de temperaturas (DTML). Se indica como Δt_m en la fórmula vista anteriormente. Esta diferencia

media de temperaturas se puede calcular mediante la siguiente fórmula, utilizando la terminología de la Figura 6.1.8.

$$\Delta t_m = \frac{(t_{i2} - t_{o1}) - (t_{o2} - t_{i1})}{\ln \frac{(t_{i2} - t_{o1})}{(t_{o2} - t_{i1})}}$$

En el ejemplo de calentamiento de leche para fabricación de queso, el valor de la diferencia de temperaturas media logarítmica, Dtml, sería de 20.8°C, calculándolo con la fórmula anterior.

Un factor importante en la determinación de la diferencia de temperatura media es la dirección de flujo de cada uno de los fluidos que intercambian calor, dentro del intercambiador de calor. Existen dos opciones principales: flujo a contracorriente y flujo paralelo.

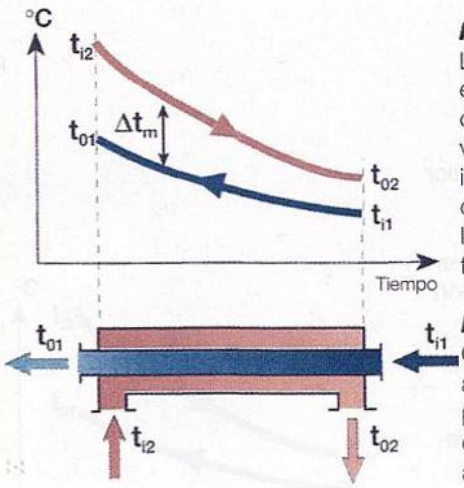


Fig. 6.1.8 *Perfiles de temperatura durante la transferencia de calor en un intercambiador de calor con flujo a contracorriente.*

Flujo a contracorriente

La diferencia de temperaturas entre los dos líquidos se utiliza mejor si éstos fluyen en direcciones opuestas a través del intercambiador de calor (Figura 6.1.8). El producto frio se encuentra a su entrada con el medio calefactor más frio, y progresivamente se va encontrando con un medio calefactor más caliente a su paso por el intercambiador. El producto, conforme pasa por el citado intercambiador, se va calentando de forma que su temperatura es sólo inferior en unos pocos grados a la del medio de calentamiento en cada punto. Este tipo de intercambio se llama flujo en contracorriente.

Flujo paralelo

Con el sistema contrario, llamado flujo paralelo (Figura 6.1.9), ambos líquido entran al intercambiador por el mismo extremo y fluyen en la misma dirección. En el flujo paralelo es imposible calentar el producto a una temperatura superior a la que se obtendría si dicho producto y el medio calefactor se mezclasen. Esta limitación no afecta al flujo en contracorriente, ya que el producto puede ser calentado hasta sólo dos o tres grados de diferencia respecto a la temperatura de entrada del medio calefactor.

Coeficiente global de transmisión de calor

Este factor, k, es una medida de la eficiencia de la transmisión de calor. Indica la cantidad de calor que pasa por hora a través de 1 m² de superficie de intercambio por cada 1°C de diferencia de temperaturas. El mismo factor se utiliza para el cálculo del espesor de aislamiento en edificios, aunque en ese caso el objeto es hacer el valor de k lo más pequeño posible, mientras que en un intercambiador de calor se trata de que el valor de k sea lo más elevado posible. Este factor depende de:

- las pérdidas de presión admisibles en ambos líquidos
- las viscosidades de los líquidos
- la forma y el espesor de la pared de intercambio
- el material de la pared de intercambio
- la presencia de suciedad depositada sobre las superficies de la pared de intercambio.

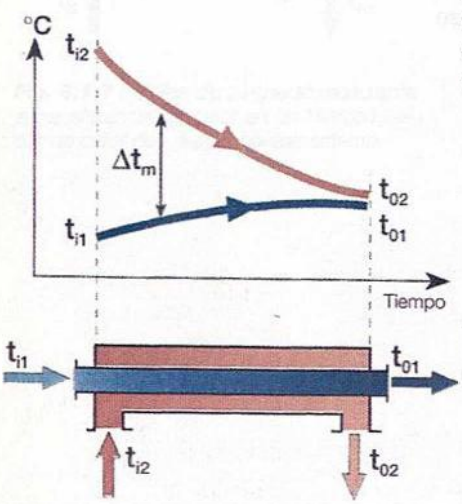


Fig. 6.1.9 *Perfiles de temperatura durante la transferencia de calor en un intercambiador de calor con flujo paralelo.*

Pérdidas de carga admisibles

Con el fin de aumentar el valor de k y mejorar así la transferencia térmica es posible reducir el tamaño de los canales a través de los cuales circula el producto. Esto hace que se reduzca la distancia a través de la cual se debe transferir el calor desde la pared hasta el centro del canal.

Sin embargo, al mismo tiempo se ve reducida el área de la sección de paso del fluido. Esto da lugar a dos resultados:

a. la velocidad de flujo a través del canal aumentará, y a su vez hará que

b. dicho flujo sea más turbulento.

Cuanto mayor es la caida de presión (son mayores las pérdidas de carga) del producto y del medio calefactor, mayor es la intensidad de transferencia de calor y más pequeña será la superficie de intercambio que se precisa.

Los productos que son sensibles a una agitación mecánica (por ejemplo, la grasa de la leche), sin embargo, pueden ver deteriorada su calidad como consecuencia de un tratamiento violento. Las pérdidas de carga a través del intercambiador también se verán aumentadas, por lo que la presión de entrada del produc-

to tendrá que incrementarse con objeto de que éste pueda pasar a través de los canales más estrechos. Puede que incluso sea necesario la instalación de una bomba de refuerzo. En algunos paises se especifica legalmente la instalación de una bomba de refuerzo, básicamente para asegurar el nivel de presión necesario en el lado del producto y poder prevenir la fuga de producto no pasteurizado hacia el producto pasteurizado, en el cuerpo de recuperación de calor del intercambiador.

Viscosidad

Las viscosidades del producto y del medio calefactor se necesitan para dimensionar el intercambiador de calor. Un líquido con una viscosidad elevada desarrolla menos turbulencia cuando fluye a través del intercambiador de calor que un producto con una viscosidad baja. Esto quiere decir que se necesita un intercambiador de calor más grande, manteniéndose constantes el resto de parámetros. Por ejemplo, trabajando con capacidades y programas de temperaturas idénticos se necesita un intercambiador de calor más grande para el tratamiento de nata que para el tratamiento de la leche.

Además, se ha de prestar una especial atención a los productos con comportamiento al flujo no-Newtoniano. Para estos productos la viscosidad aparente depende no sólo de la temperatura sino también del gradiente de velocidad. Un producto que parece más bien espeso en un tanque puede fluir mucho mejor cuando se bombea a través de tuberías o de un intercambiador de calor. El comportamiento al flujo de tales productos debe medirse con instrumentos especiales para poder realizar los cálculos correctamente (ver el Capítulo 3. Reología).

Forma y espesor de la pared de intercambio

La pared de intercambio es a menudo corrugada para crear un flujo más turbulento, que provoca una mejor transferencia de calor. La Figura 6.1.10 muestra tres diseños diferentes.

El espesor es también importante. Cuanto más delgada es la pared, mejor será la transferencia de calor. Pero el espesor se ha de determinar teniendo en cuenta además que el espesor ha de ser suficiente para aguantar las presiones de los líquidos que intercambian calor. Las técnicas modernas de diseño y producción permiten paredes más delgadas que las que se tenían hace relativamente pocos años.

Material de construcción de la pared de intercambio

Para el procesado de alimentos el material más usual es el acero inoxidable, que tiene unas características de transferencia de calor relativamente buenas.

Presencia de suciedad depositada en las superficies de intercambio

La mayoría de los productos lácteos son sensibles al calor, por lo que se ha de aplicar de forma cuidadosa para evitar cambios indeseables en el producto. Las proteinas coagulan y se incrustan en la superficie caliente de la pared de un recipiente que se utilice para el calentamiento de la leche. Lo mismo ocurrirá en un intercambiador de calor si se utilizan temperaturas de calentamiento demasiado elevadas.

Por lo tanto, la diferencia de temperaturas entre el medio de calentamiento y el producto ha de ser lo más pequeña posible, normalmente de 2-3°C por encima de la temperatura de pasteurización. Si la superficie se mantiene a una temperatura demasiado elevada en relación con el producto, existe el riesgo de que las proteinas de la leche coagulen y se depositen formando una fina capa sobre la pared de intercambio. De esta forma, el calor se ha de transferir a través de esta capa de suciedad depositada, lo que provoca que disminuya el coeficiente global de transmisión de calor, k.

La diferencia de temperaturas entre el medio calefactor y el producto será, entonces, insuficiente para que tenga lugar la misma transferencia de calor que antes del ensuciamiento y la temperatura de salida del producto caerá. Esto puede ser compensado incrementando la temperatura del medio de calentamiento, pero esto también aumenta la temperatura de la superficie y provoca que se coagule una mayor cantidad de proteinas sobre la superficie, y que aumente el espesor del ensuciamiento y, de esta manera, una disminución de k.

El valor de k también viene afectado por el incremento o decremento de la velocidad de flujo a través del intercambiador de calor, ya que afecta las características de flujo. Al aumentar la velocidad de flujo se aumenta la turbulencia y se aumenta el valor de k. La disminución de la velocidad hace que éste sea más lami-

Fig. 6.1.10 *La forma de la pared en un intercambiador de placas puede ser diferente en función del producto a tratar y de las necesidades de eficiencia térmica.*

nar, y disminuye el valor de k. Entonces, normalmente será aconsejable evitar variaciones de velocidad de flujo a través del intercambiador de calor, pero por razones económicas se pueden aceptar algunas variaciones en ciertos tipos de producción.

Ejemplo: En el caso considerado anteriormente de calentamiento de leche para fabricación de queso, el coeficiente de transferencia de calor puede valer del orden de 5000 W/m².K, si se trata de un intercambiador de calor de placas construidas en acero inoxidable y las placas no están demasiado sucias.

Los otros factores que aparecen en la fórmula serían:

- Velocidad de flujo = 20000 l/h
- Densidad = 1020 kg/m³
- Calor específico = 3.95 kJ/kg.K
- Cambio de temperatura = 30°C
- Diferencia de temperaturas = 20.8°C
- Coeficiente de transferencia de calor = 5000 W/m².K

La superficie de transferencia de calor necesaria se puede calcular como:

$$A = \frac{20\,000 \times 1\,020 \times 3.95 \times 30}{3\,600 \times 20.8 \times 5\,000} = 6.5\ m^2$$

Este valor se ha de considerar como un valor teórico. En la práctica actual las exigencias impuestas por la naturaleza más o menos sensible del producto y el proceso deben ser también consideradas. Dos de estos factores, no incluidos en la fórmula anterior, son las necesidades de limpieza y de tiempo de operación.

Necesidades de limpieza

Un intercambiador de calor de una industria láctea se ha de limpiar al final de cada ciclo de producción. Esta limpieza se realiza mediante recirculación de detergentes por el circuito por donde circula la leche en condiciones de proceso. El proceso de limpieza se describe con mayor profundidad en el Capítulo 21.

Para conseguir una limpieza eficiente, el intercambiador de calor se ha de diseñar no sólo para conseguir el deseado programa de temperaturas, sino también teniendo en cuenta la limpieza.

En algunas zonas del intercambiador se tiene cierta amplitud, por ejemplo cuando se tienen varios canales en paralelo, y la turbulencia durante la limpieza puede que no sea suficiente para eliminar de forma efectiva los depósitos de suciedad. Por otro lado, algunas zonas puede que sean muy estrechas, porque se tengan por ejemplo pocos canales en paralelo, de forma que la turbulencia sea tan elevada que la pérdida de presión sea excesiva. Estas pérdidas de presión muy elevadas reducen la velocidad de flujo de la solución de limpieza, reduciéndose por tanto su efectividad. Un intercambiador de calor debe ser diseñado para permitir una limpieza efectiva.

Necesidades de tiempo de funcionamiento

Siempre ocurrirá un cierto ensuciamiento cuando los productos lácteos se calientan a temperaturas superiores a 65°C. Esto significa que siempre se tendrá una limitación de tiempo de funcionamiento antes de que el intercambiador de calor se pare para que pueda efectuarse la limpieza del mismo.

Este tiempo de funcionamiento es difícil, si no imposible, de predecir, ya que viene determinado por la cantidad de suciedad depositada.

La velocidad de formación de esa capa de suciedad depende de muchos factores tales como:

- Diferencia de temperaturas entre el producto y el medio de calentamiento
- Calidad de la leche
- Contenido de aire del producto
- Condiciones de presión de la sección de calentamiento.

Es especialmente importante mantener el contenido de aire tan bajo como sea posible. Un exceso de aire en el producto contribuirá notablemente al aumento del ensuciamiento. Bajo ciertas condiciones, los tiempos de funcionamiento entre limpiezas se pueden también limitar por el crecimiento de microorganismos aguas abajo de la sección de regeneración de un intercambiador de calor de placas. Sin embargo, esto es raro. Cuando ocurre esto normalmente está relacionado con el pretratamiento de la leche.

Todos estos factores implican que sea importante permitir la limpieza a intervalos regulares cuando se establece el plan de producción para los pasteurizadores.

Regeneración

El método que consiste en utilizar el calor de un líquido caliente, como la leche pasteurizada, para precalentar la leche fría entrante, se denomina regeneración. La leche fría también sirve para enfriar la caliente, reduciéndose así el consumo de agua y de energía. Se pueden conseguir eficiencias de regeneración de hasta el 94-95% en las modernas instalaciones de pasteurización.

Si se toma el perfil de operación más simple, como el tratamiento térmico de la leche cruda, como ejemplo, se utilizará la fórmula:

$$R = \frac{(t_r - t_i) \times 100}{(t_p - t_i)}$$

donde
R = eficiencia de regeneración, %
t_r = temperatura de la leche después de la regeneración (en este caso = 68°C)
t_i = temperatura de entrada de la leche cruda (en este caso = 4°C)
t_p = temperatura de pasteurización (en este caso = 72°C)
obteniéndose:

$$R = \frac{(68 - 4) \times 100}{(72 - 4)} = 94.1\%$$

Mantenimiento

Un tratamiento térmico correcto exige que la leche se mantenga durante un tiempo determinado a la temperatura de pasteurización. Esto se hace en una sección externa de mantenimiento.

La sección externa de mantenimiento consiste generalmente en una tubería dispuesta en forma de espiral o de zig-zag que a veces aparece cubierta por una rejilla protectora para impedir que el personal se pueda quemar al tocar esta sección de mantenimiento. La longitud de la tubería y la velocidad de flujo se calculan de forma que el tiempo de permanencia en esta sección sea igual al tiempo requerido de mantenimiento.

Es necesario controlar de forma precisa el caudal de producto que pasa por la sección de mantenimiento, ya que ésta ha sido dimensionada para conseguir un tiempo determinado de mantenimiento para un caudal determinado. El tiempo de mantenimiento es inversamente proporcional al caudal de producto en esta sección.

Inicialmente, las secciones de mantenimiento formaban parte de los cuerpos del intercambiador de calor de placas, pero actualmente son casi exclusivamente secciones externas.

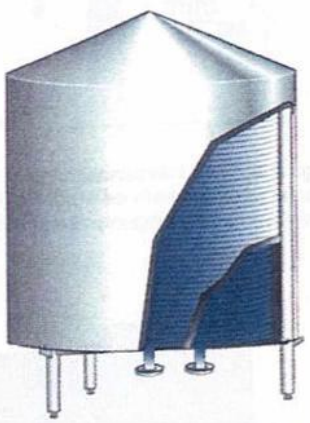


Fig. 6.1.11 *Tubo de mantenimiento dispuesto en espiral para largos tiempos de mantenimiento.*

Cálculo del tiempo de mantenimiento

La longitud apropiada del tubo para conseguir un adecuado tiempo de mantenimiento se puede calcular cuando se conocen la capacidad horaria y el diámetro interior del tubo de mantenimiento. Como el perfil de velocidades en el tubo de mantenimiento no es uniforme, algunas porciones de leche tendrán una velocidad de circulación superior a la media. Para asegurar que incluso las porciones que se mueven a mayor velocidad sean pasteurizadas suficientemente, se debe de utilizar un factor de eficiencia. Este factor depende del diseño del tubo de mantenimiento, pero normalmente vale entre 0.8 y 0.9.

Los datos que se necesitan para realizar el cálculo son:

Fórmula

1. $V = \frac{Q \times TM}{3.600 \times \eta}$ dm^3

2. $L = \frac{V \times 4}{\pi \times D^2}$ dm

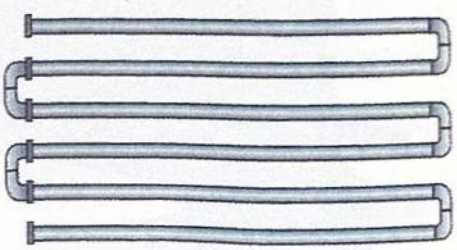


Fig. 6.1.12 *Tubo de mantenimiento en zig-zag.*

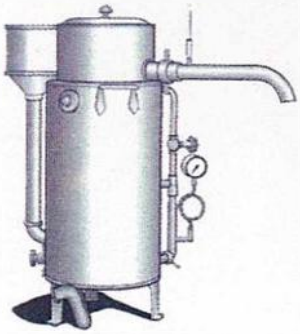


Fig. 6.1.13 *Este tipo de flash pasteurizador con una turbina motorizada como agitador fue construido y vendido por AB Separator entre 1896 y 1931.*

Q = Caudal de pasteurización, l/h
TM = Tiempo de mantenimiento, en segundos
L = Longitud del tubo de mantenimiento, en dm, correspondiente a Q y TM
D = Diámetro interior del tubo de mantenimiento, en dm, por conocer o adaptado al de otras tuberías
V = volumen de leche en l o dm^3 que se corresponden con Q y TM
η = factor de eficacia

Ejemplo: Un tiempo de mantenimiento (TM) de 15 segundos se necesitan en una instalación de pasteurización con una capacidad (Q) de 10000 l/h. El diámetro interior (D) de la tubería a utilizar es de 48.5 mm = 0.485 dm. Calcular la longitud (L) del tubo de mantenimiento, considerando un factor de eficacia de 0.85.

1. $V = \dfrac{10\,000 \times 15}{3\,600 \times 0.85} = 49.0\ dm^3$

2. $L = \dfrac{49.0 \times 4}{\pi \times 0.485^2} = 265.5\ dm \text{ or } 26.5\ m$

La longitud del tubo de mantenimiento debe ser de unos 26.5 m.

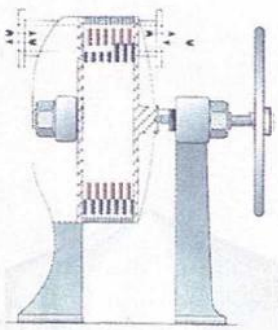


Fig. 6.1.14 *El intercambiador de calor de placas fue patentado en 1890 por los inventores alemanes Langen y Hundhausen.*

Tipos de intercambiadores de calor

Al final del siglo XIX el tipo de intercambiador de calor más ampliamente utilizado era el que se muestra en la Figura 6.1.13. A pesar de sus muchos defectos, este modelo de intercambiador de calor estaba aún en uso en muchas industrias lácteas incluso en los años 1950.

En 1878 un alemán, Albert Dracke, depositó una patente de un aparato en el que un líquido podía enfriar a otro fluyendo cada uno de los fluidos en capa fina a ambos lados de la pared de intercambio en una serie de placas. Se desconoce si alguna de estas patentes cubre el intercambiador de calor que se muestra en la Figura 6.1.14. Sin embargo, a comienzos de los años 1920 las viejas ideas alemanas eran retomadas, desarrollándose un intercambiador de calor regenerativo que se basaba en estos conceptos. Desde entonces los intercambiadores de calor de placas han asumido un papel predominante en las operaciones de calentamiento y enfriamiento en la industria láctea.

Los tres tipos siguientes de intercambiadores de calor son los más ampliamente utilizados actualmente:

- Intercambiador de calor de placas
- Intercambiador de calor tubular
- Intercambiador de calor de superficie rascada

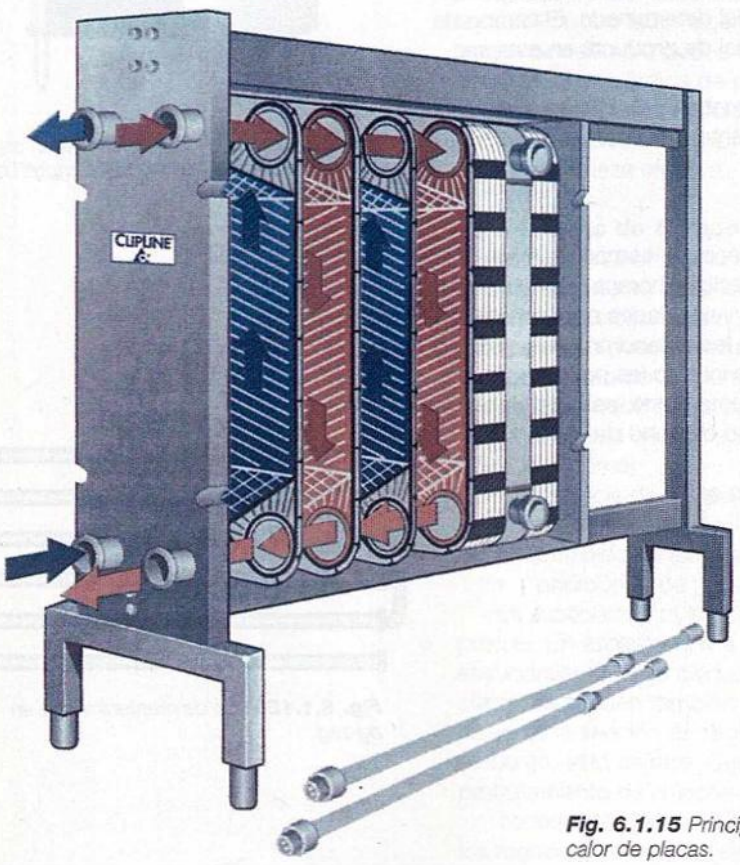


Fig. 6.1.15 *Principios de flujo y transferencia de calor en un intercambiador de calor de placas.*

Intercambiadores de calor de placas

Casi todo el intercambio térmico en productos lácteos se realiza en intercambiadores de placas. El intercambiador de calor de placas (para su designación se utiliza con frecuencia las abreviaturas inglesas de Plate Heat Exchanger, PHE) consta de un paquete de placas de acero inoxidable, sujetas por un bastidor.

El bastidor puede contener varios paquetes de placas separados, formando secciones o cuerpos, en las cuales se efectuarán diversos procesos como pueden ser los precalentamientos, calentamientos finales, y enfriamiento. El medio de calentamiento es agua caliente, y el medio de enfriamiento puede ser agua fría, agua helada o glicolada (con propilenglicol, por ejemplo), dependiendo de las temperaturas de salida requeridas para el producto.

Las placas están corrugadas de forma que se consiga una transferencia óptima de calor. El paquete de placas se encuentra comprimido en el bastidor. Puntos de soporte en las ondulaciones de las placas hacen que éstas se mantengan separadas de forma que existan canales delgados entre ellas.

Los líquidos entran y salen de los canales a través de portillos situados en las esquinas de las placas. A base de abrir portillos y dejar ciegos otros se conducen los líquidos de un canal al siguiente. Las juntas colocadas en los bordes de las placas y de los portillos limitan los canales y evitan goteos.

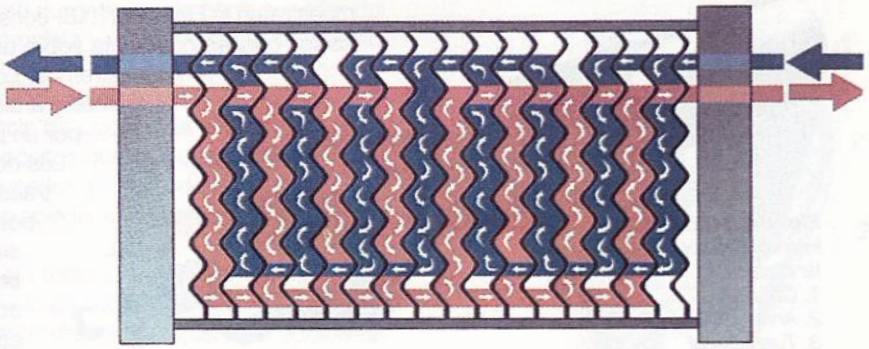


Fig. 6.1.16 *Sistema de flujo en paralelo tanto para los canales de producto como para los del medio calentamiento/enfriamiento.*

Tipos de flujo

El producto entra por un portillo de una esquina en el primer canal de la sección y fluye verticalmente por dicho canal. Sale por el otro extremo a través de otro portillo que le conduce hasta el siguiente canal, y asi sucesivamente. La disposición del paso por los portillos se hace de manera que el producto pase por canales alternos en el paquete de placas.

El medio calefactor o refrigerante se introduce por el otro extremo de la sección y pasa por ella de la misma forma, es decir, a través de canales alternos. Por lo tanto, cada canal por donde circula producto tiene a ambos lados un canal por donde circula el medio calefactor o refrigerante.

Para conseguir una buena eficiencia en la transmisión de calor, los canales que quedan entre las placas deben ser lo más estrechos posible, pero, por otra parte, tanto la velocidad del flujo como la caida de presión serán mayores si se hace pasar un fuerte volumen de producto entre canales estrechos. Ninguno de estos efectos es deseable, y para evitarlos el paso del producto a través del intercambiador de calor se divide en una serie de flujos paralelos.

En la Figura 6.1.16 el flujo de producto, en azul, se divide en dos paralelos, que cambian de dirección cuatro veces en la sección. Los canales para el medio de calentamiento, en rojo, se dividen en cuatro flujos paralelos que cambian de dirección dos veces.

Esta combinación se indica como de 4x2/2x4, que indica el número de veces de paso y el número de flujos paralelos para el producto azul sobre el número de veces de paso y del número de flujos paralelos del medio de calentamiento. Esto se denomina como agrupamiento de las placas.

Intercambiadores de calor tubulares

Estos intercambiadores de calor tubulares (THE, del inglés tubular heat exchangers) se utilizan en algunos casos en los tratamientos de pasteurización/esterilización UHT de productos lácteos. El intercambiador de calor tubular, tal como se indica en la Figura 6.1.17, a diferencia de los intercambiadores de placas, no tiene puntos de contacto en los canales de producto, y puede manejar por tanto productos con partículas hasta de un cierto tamaño. El máximo tamaño de partícula depende del diámetro del tubo. Estos intercambiadores tubulares también pueden trabajar durante más tiempo entre limpiezas que los intercambiadores de placas en tratamientos UHT.

Desde el punto de vista de transferencia de calor los intercambiadores tubulares son menos eficientes que los de placas.

Los intercambiadores de calor tubulares se presentan fundamentalmente según dos diseños: multi/mono canal y multi/mono tubo.

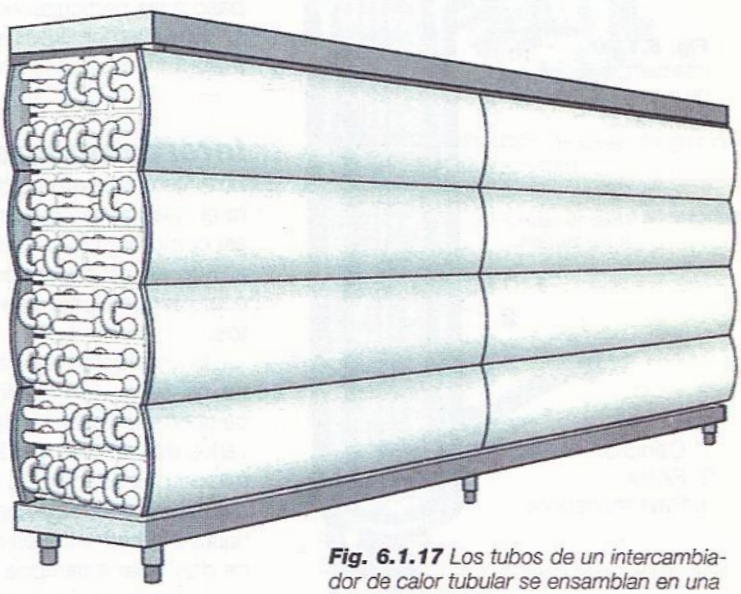


Fig. 6.1.17 *Los tubos de un intercambiador de calor tubular se ensamblan en una unidad compacta.*

Multi/mono canal

La superficie de transferencia de calor de un intercambiador de calor tubular multicanal, tal como se

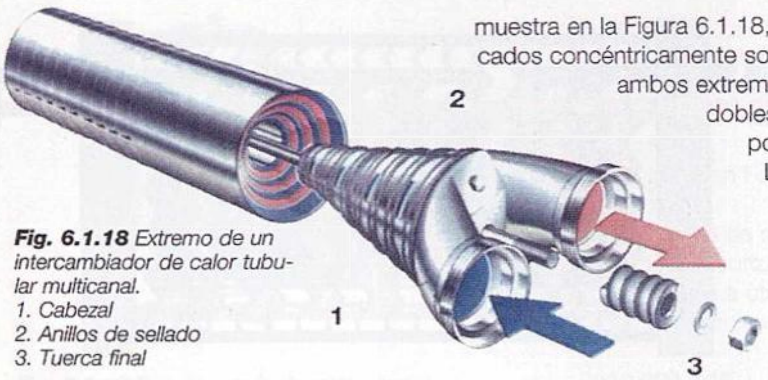


Fig. 6.1.18 *Extremo de un intercambiador de calor tubular multicanal.*
1. Cabezal
2. Anillos de sellado
3. Tuerca final

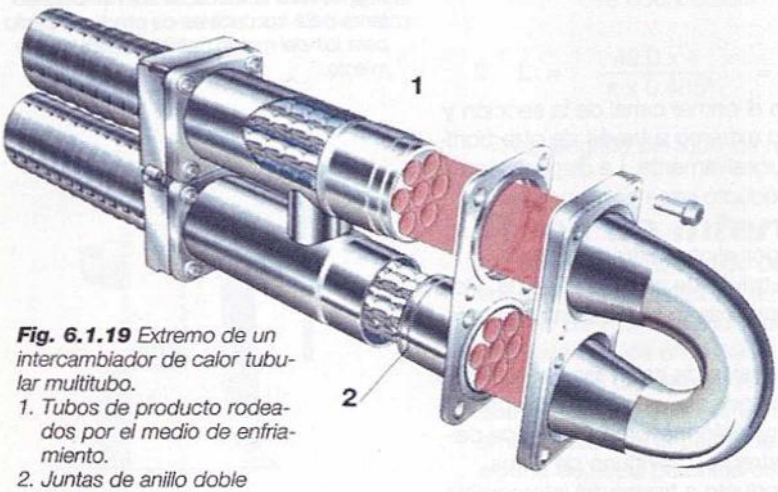


Fig. 6.1.19 *Extremo de un intercambiador de calor tubular multitubo.*
1. Tubos de producto rodeados por el medio de enfriamiento.
2. Juntas de anillo doble

muestra en la Figura 6.1.18, consta de tubos rectos de diferentes diámetros colocados concéntricamente sobre un eje común mediante cabezales (1) situados en ambos extremos. Los tubos se sellan respecto al cabezal mediante dobles anillos (2), y el ensamblado entero se mantiene unido por un perno (3).

Los dos medios de intercambio de calor fluyen en contracorriente en canales anulares alternados entre tubos concéntricos. El medio caloportador se alimenta siempre por el canal más exterior. Un cabezal en cada extremo actúa tanto de distribuidor como de colector, suministrando un medio a un conjunto de canales y descargando el medio de otro conjunto. La configuración corrugada de los tubos mantiene ambos medios en un estado de turbulencia para conseguir la máxima eficiencia de transferencia de calor.

También es posible utilizar este tipo de intercambiador de calor tubular para la regeneración directa producto/producto.

El monocanal es una versión que dispone de un sólo espacio anular como canal de producto encerrado entre dos canales concéntricos por donde circula el medio caloportador.

Multi/mono tubo

El intercambiador de calor tubular multitubo opera según el clásico principio de la carcasa y tubos, con el producto fluyendo a través del grupo de tubos paralelos y el fluido caloportador entre y alrededor de los tubos. La turbulencia para conseguir una buena eficiencia en la transferencia de calor se crea mediante unas corrugaciones helicoidales realizadas sobre los tubos y la carcasa.

La superficie de intercambio de calor se consigue con un haz de tubos rectos corrugados o tubos lisos (1) unidos a una brida plana en ambos extremos, tal como se indica en la Figura 6.1.19. Las bridas de los tubos están a su vez sellados respecto de la carcasa exterior por medio de un anillo doble (2) (diseño flotante). Este diseño permite que los tubos puedan ser extraidos de la carcasa sin desatornillar los pernos de los extremos. Esto facilita el desmontaje para inspección.

El diseño flotante absorbe la expansión térmica y también permite que el haz de tubos en la carcasa pueda ser cambiado, permitiendo diferentes combinaciones de flujo de aplicación según sea el producto a tratar.

El monotubo es una versión que tiene un único tubo interior, que permitirá el paso a las partículas con un diámetro de hasta 50 mm.

Los intercambiadores multi/mono tubo son muy adecuados en procesos que trabajan a muy altas presiones y altas temperaturas.

Fig. 6.1.20
Intercambiador de calor de superficie rascada de tipo vertical

Intercambiador de calor de superficie rascada

Los intercambiadores de calor de superficie rascada (Figura 6.1.20) se diseñan para el calentamiento o enfriamiento de productos viscosos, pegajosos y grumosos, asi como para la cristalización de algunos productos. Las presiones de trabajo en el lado del producto son altas, llegando incluso hasta 40 bar. De esta manera, cualquier producto que pueda ser bombeado puede ser tratado en estos aparatos.

Un intercambiador de calor de superficie rascada consiste en un cilindro (1) a través del cual se bombea el producto en flujo a contracorriente respecto del fluido caloportador que circula por la camisa exterior. Los rotores intercambiables (2) de varios diámetros, de 50.8 a 127 mm, y las palas (3) de distintas configuraciones permiten la adaptación de este intercambiador a distintas aplicaciones. Los rotores de diámetro más pequeño permiten el paso de las partículas más grandes (de hasta 25 mm) a través del cilindro, mientras que los rotores de diámetro más grande dan lugar a tiempos de residencia más cortos y mejoran el rendimiento térmico.

El producto entra en el cilindro vertical a través de la entrada inferior y fluye continuamente de abajo hacia arriba a través del cilindro. Cuando el proceso se

pone en marcha, todo el aire es completamente purgado por la parte superior del cilindro, permitiendo que el producto cubra completa y uniformemente la superficie de enfriamiento o calentamiento.

Las palas rotatorias eliminan continuamente el producto de la pared (Figura 6.1.21) para asegurar una uniforme transferencia de calor hacia el producto. Además, la superficie se mantiene libre de depósitos que se puedan producir.

El producto sale del cilindro por la parte superior. El flujo de producto y la velocidad del rotor se varían para ajustarse a las propiedades del producto que fluye a través del cilindro.

En las paradas, gracias al diseño vertical, el producto puede ser desplazado por el agua con una mínima mezcla lo que ayuda a asegurar la recuperación del producto al final de cada tratamiento. Además, el drenaje completo del equipo facilita la limpieza automática CIP y el cambio de producto.

Tal como se ha indicado anteriormente, el rotor y las palas son intercambiables, en una operación que es posible llevar a cabo por medio de un dispositivo hidráulico automático que facilita la subida y bajada del conjunto rotor/palas (Figura 6.1.22).

Productos típicos que son tratados en un intercambiador de calor de superficie rascada son mermeladas, dulces, salsas, chocolate y manteca de cacahuete. También se utiliza en grasas y aceites en la cristalización de margarina y "shortenings", etc.

El intercambiador de calor de superficie rascada también tiene versiones diseñadas especialmente para el procesado aséptico.

Dos o más intercambiadores de calor de superficie rascada del tipo vertical se pueden disponer en serie o en paralelo para conseguir una mayor superficie de transferencia de calor dependiendo de la capacidad de proceso requerida.

Fig. 6.1.21 *Sección de un intercambiador de calor de superficie rascada.*
1. Rotor
2. Pala rascadora
3. Cilindro.

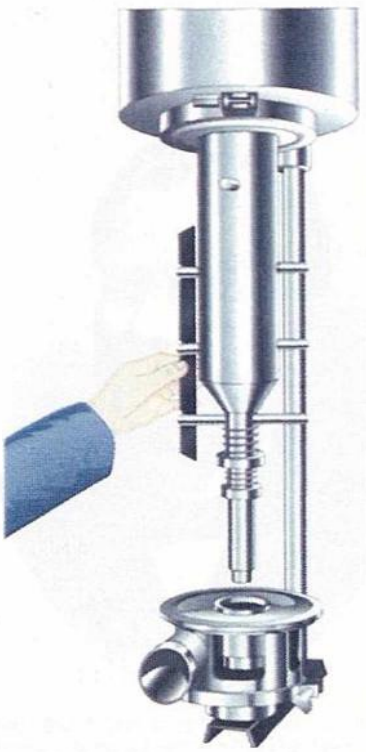


Fig. 6.1.22 *Extracción de palas del grupo rotor, en posición más baja.*

Separadoras centrífugas y normalización de la grasa de la leche

Separadoras centrífugas

Algunos datos históricos

La primera patente de un equipo para separar la nata de la leche fué descrita en la revista alemana de industria "Milch-Zeitung" en el número del 18 de abril de 1877. Ese equipo se describía como "un tambor fabricado con la capacidad de rotar y que, tras girar durante cierto tiempo, consigue que la nata quede flotando sobre la superficie de forma que se pueda separar posteriormente de manera manual".

Tras la lectura de este artículo, un joven ingeniero sueco, Gustaf de Laval, dijo " yo demostraré que la fuerza centrífuga actuará en Suecia tan bien como en Alemania". El diario de noticias "Stockolms Dagblad" del 15 de enero de 1879 informaba que: "Una separadora centrífuga para el desnatado de la leche está en exposición aquí desde ayer y se harán demostraciones cada día entre las 11 de la mañana y las 12 del mediodía en el primer piso de la casa del número 41, de Regeringsgatan. La máquina consiste en un tambor que es movido por medio de una cinta y una polea. La nata, que es más ligera que la leche, se separa por la fuerza centrífuga hasta la superficie de la leche y fluye hacia fuera a través de un canal hasta un envase de recogida de la nata. Bajo este canal de salida de la nata se dispone el canal de salida de la leche que es forzada a salir hasta otro envase separado de recogida".

Desde 1890 las separadoras construidas por Gustaf de Laval estaban equipadas con discos cónicos especialmente diseñados, cuya patente fué depositada en 1888 en el Freiherr von Bechtolsheim alemán, y posteriormente adquirida en 1889 por la compañía sueca AB Separator, de la cual era socio Gustaf de Laval. Actualmente la mayoría de las centrífugas van equipadas con grupos de discos cónicos.

Fig. 6.2.2 *Una de las primeras separadoras, la Alfa A1, fabricada desde 1882.*

Fig. 6.2.1 *Gustaf de Laval, inventor de la primera separadora centrífuga de funcionamiento continuo.*

Fig. 6.2.3 *La arena se hunde y el aceite flota tras mezclarse en agua.*

Sedimentación por gravedad

Históricamente hablando, la separación centrifuga es una invención reciente. Hasta hace un centenar de años, la técnica utilizada para la separación de una sustancia de otra era el proceso natural de sedimentación por gravedad.

La sedimentación tiene lugar de forma continua. Las particulas de arcilla que se mueven en el agua acaban por sedimentar, dejando un liquido claro. Las nubes de arena agitada por las olas o por los pies de los bañistas acaban también por sedimentarse. El aceite que escapa al mar es menos pesado que el agua, por lo que sube a la superficie formando masas flotantes.

La sedimentación por gravedad fue también la técnica que originalmente se utilizó en las industrias lácteas para separar la grasa de la leche. Para ello, se deja la leche fresca de la vaca en un recipiente. Después de algún tiempo, los glóbulos de grasa se van agragando y suben a la superficie, donde forman una capa de nata sobre la leche. Esta capa se puede entonces retirar a mano.

Condiciones para la sedimentación

Para que se produzca la sedimentación el líquido a tratar debe ser una dispersión, es decir, una mezcla de dos o más fases, una de las cuales es continua. En la leche es el suero, o la leche desnatada, el que forma esa fase continua. La grasa se encuentra dispersa en el resto de la leche, en forma de glóbulos con diámetros variables que llegan a alcanzar 15 μm. La leche también contiene una tercera fase, consistente en particulas sólidas dispersas, tales como células de la ubre, suciedad en forma de polvo del establo, etc.

Las fases a separar no deben ser solubles entre sí. Las sustancias disueltas en una solución no pueden ser separadas por sedimentación.

La lactosa disuelta no puede ser separada por medio de centrifugación. Puede, sin embargo, cristalizar si se somete la leche al proceso correspondiente. Entonces, sí es posible la separación de los cristales de lactosa por sedimentación.

Las fases que se pretende separar deben tener también diferentes densidades. En el caso de la leche, las fases presentes satisfacen esta condición. Las impurezas sólidas tienen una densidad mayor que la leche desnatada y los glóbulos de grasa tienen una densidad menor.

¿Cómo tiene lugar la sedimentacion?

Si se arroja una piedra al agua, nos sorprendería mucho que no se hundiese. Del mismo modo, esperamos que un corcho flote. Por la experiencia, sabemos que una piedra es más pesada y que un corcho es más ligero que el agua.

Pero, ¿qué sucede si arrojamos una piedra al mercurio, un metal liquido con una densidad muy alta? ¿Y si dejamos caer un trozo de hierro en mercurio? No tenemos experiencia que nos ayude a predecir el resultado. Podríamos esperar que el trozo de hierro se hundiese. Pero en la realidad, tanto la piedra como el trozo de hierro flotarán.

Las sustancias en solución no se pueden separar por medio de la sedimentación.

Densidad

Todas las sustancias tienen una propiedad física llamada densidad. La densidad es una medida de lo pesada que es la materia y puede ser expresada en kg/m³. Si pesamos 1 m³ de hierro, veremos que la balanza marca 7.860 kg. La densidad del hierro es 7.860 kg/m³. La densidad del agua a temperatura ambiente es de 1.000 kg/m³ y la de la piedra (granito) es de 2.700 kg/m³, siendo la del corcho 180 kg/m³ y la del mercurio a temperatura ambiente de 13.550 kg/m³.

Cuando se arroja un objeto a un líquido es básicamente la diferencia entre las densidades de dicho objeto y la del líquido la que determina si flotará o se hundirá. Si la densidad del objeto es superior a la del líquido se hundirá, pero si es menor flotará.

La densidad se suele representar por la letra griega ρ. Con la densidad de una partícula r_p y la densidad de un liquido r_l es posible formar la expresión $(\rho_p - \rho_l)$, es decir, la diferencia de densidad entre dicha partícula y el líquido. Si echamos una piedra al agua, la diferencia de densidad será (2.700 - 1.000) = 1.700 kg/m³. El resultado es un número positivo, ya que la densidad de la piedra es superior a la del agua. ¡La piedra se hundirá!.

La expresión correspondiente para un corcho en el agua es (180 - 1.000) = -820 kg/m³. En este caso, el resultado es negativo, porque la baja densidad del cor-

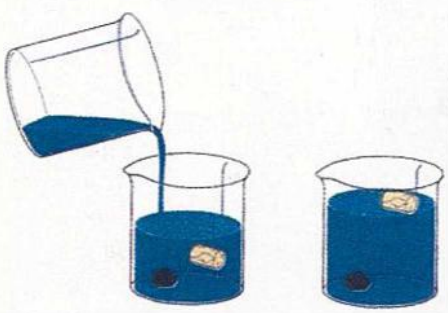


Fig. 6.2.4 *El corcho es más ligero que el agua y flota. La piedra es más pesada que el agua y se hunde.*

cho hace que éste flote cuando se le arroja al agua. Se moverá en dirección contraria a la fuerza de la gravedad.

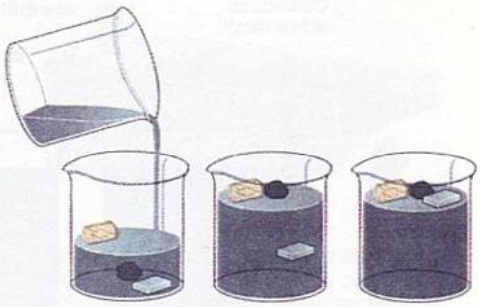


Fig. 6.2.5 *El acero, la piedra y el corcho tienen densidades más bajas que el mercurio y por lo tanto flotarán sobre el mercurio.*

Velocidad de flotación y sedimentación

Una partícula sólida o una gota de líquido que se mueve a través de un fluido viscoso, bajo la influencia de la gravedad, acabarán por alcanzar una velocidad constante, a la que se le llama velocidad de sedimentación. Si la densidad de la partícula es menor que la del medio la partícula flotará a esa velocidad de flotación. Estas velocidades se representan como v_g (g = fuerza de la gravedad). La magnitud de la velocidad de sedimentación/flotación viene determinada por las siguientes cantidades físicas:

- Diámetro de la particula **d** (en m).
- Densidad de la partícula ρ_p (en kg/m3).
- Densidad de la fase contínua ρ_l (en kg/m^3).
- Viscosidad de la fase contínua η (en kg/m.s).
- Atracción gravitacional de la tierra **g** (9.81 m/s^2).

Si se conocen los valores de estas cantidades, la velocidad de sedimentación/flotación de la partícula o gota puede calcularse por medio de la fórmula siguiente, que se deriva de la *ley de Stokes*:

$$1) \qquad V_g = \frac{d^2 (\rho_p - \rho_l)}{18\eta} \, g$$

Dicha ecuación (1) muestra que la velocidad de sedimentación/flotación de la partícula o gota:

- aumenta con el cuadrado del diámetro de la partícula. Esto quiere decir que una particula de diámetro d = 2 cm sedimentará/flotará cuatro veces más rápidamente ($2^2 = 4$) que una partícula de diámetro d = 1 cm.
- aumenta conforme lo hace la diferencia de densidades entre ambas fases.
- aumenta al reducirse la viscosidad de la fase continua.

Velocidad de flotación de un glóbulo graso

Si tenemos leche fresca en un envase, los glóbulos de grasa comenzarán a ascender hacia la superficie. La velocidad de ascenso o flotación puede ser calculada con la ayuda de la ecuación anterior. Los siguientes valores medios son de aplicación a una temperatura ambiente de unos 35ºC:

$d = 3 \text{ mm} = 3 \times 10^{-6} \text{ m}$

$(\rho_o - \rho) = (980 - 1.028) = -48 \text{ kg/m}^3$

$\eta = 1.42 \text{ cP (centipoise)} = 1.42 \times 10^{-3} \text{ kg/m.s}$

Sustituyendo estos valores en la fórmula se obtiene:

$$1) \; Vg = \frac{(3 \times 10^{-6}) \times 48}{18 \times 1.42 \times 10^{-3}} \times 9.81 = \frac{9 \times 10^{-12} \times 48}{18 \times 1.42 \times 10^{-3}} \times 9.81 =$$

$$= 0.166 \times 9.81 = 10^{-6} \text{ m/s} = 0.166^{-3} \text{ mm/s} = 0.597 \text{ mm/h}$$

Como se ha indicado anteriormente, los glóbulos de grasa ascienden muy lentamente. Un glóbulo de grasa con un diámetro de 3 μm se mueve hacia arriba con una velocidad de flotación de $2^2 \times 0.6 = 2.4$ mm/h,. Como los glóbulos de grasa se agrupan en grandes racimos la flotación tendrá lugar a una velocidad mayor.

La Figura 6.2.6 muestra de forma esquemática cómo se mueven los glóbulos de grasa de distintos diámetros en el suero de la leche bajo la influencia de la gravedad. Al comienzo, dichos glóbulos están en el fondo de la vasija. Después de t minutos ha tenido lugar una cierta flotación y después de 3 t minutos los glóbulos de grasa de mayores dimensiones han alcanzado la superficie. Para entonces, los glóbulos de tamaño medio han alcanzado un punto a mitad de camino hacia la superficie, pero los más pequeños sólo han cubierto un cuarto de la distancia.

Separación discontínua por gravedad

El envase A de la Figura 6.2.7 contiene una dispersión en la cual la fase dispersa consta de partículas sólidas con un diámetro uniforme *d* y una densidad mayor que la del líquido. Para que todas las partículas se sedimenten en el fondo de la vasija la suspensión debe dejarse durante el tiempo necesario para que dichas

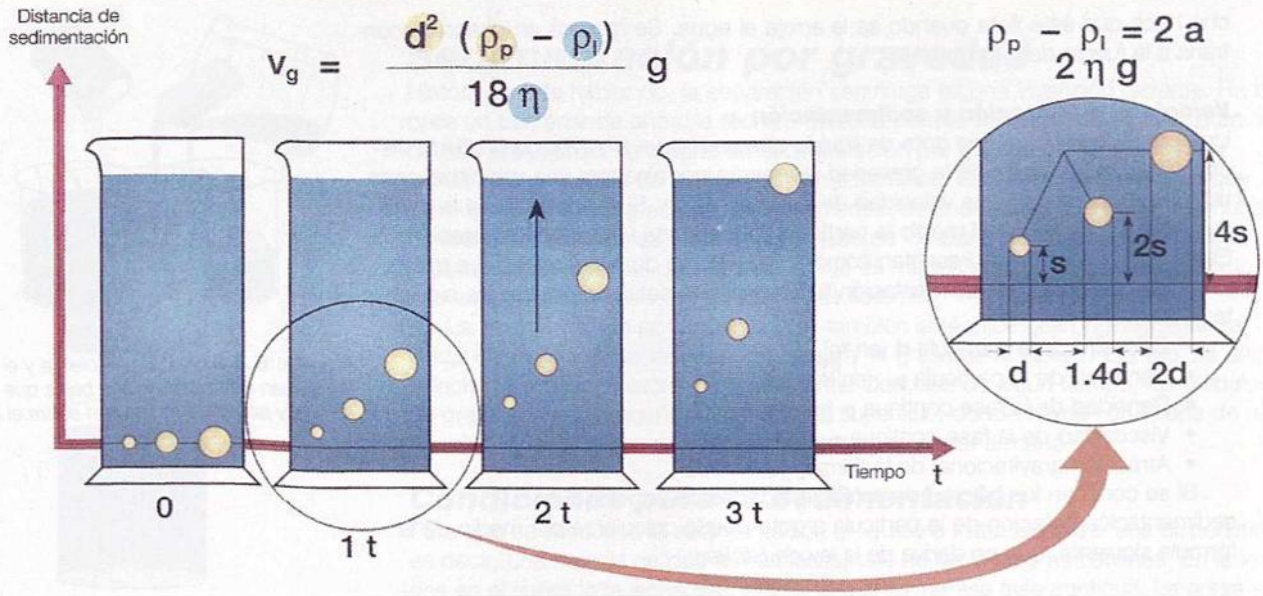


Fig. 6.2.6 *Velocidades de flotación de los glóbulos de grasa con diferentes diámetros.*

partículas bajen desde la superficie al fondo. La distancia de sedimentación en este caso es h_1 metros.

El tiempo necesario para completar la separación puede reducirse si acortamos la distancia de sedimentación. La altura de la vasija (B) ha sido disminuida y su área aumentada, de forma que se mantenga el mismo volumen. La distancia de sedimentación (h_2) se reduce a 1/5 de h_1 y el tiempo necesario para completar la separación se ve, por lo tanto, reducido a 1/5. Sin embargo, cuanto más se redu-

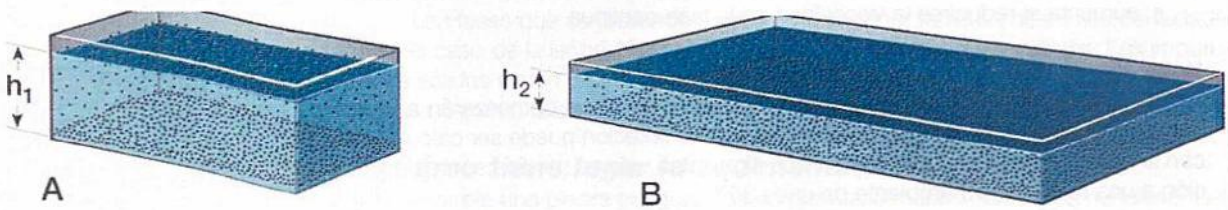


Fig. 6.2.7 *Recipientes de sedimentación con igual volumen pero con diferentes distancias de sedimentación (h_1 y h_2 siendo $h_1 > h_2$).*

ce la distancia de sedimentación y el tiempo necesario, más superficie se necesita en la vasija.

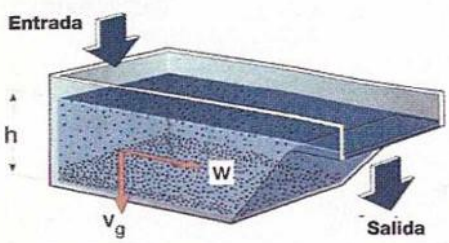


Fig. 6.2.8 *Recipiente de separación continua de sólidos de un líquido.*

Separación continua por gravedad

La Figura 6.2.8 muestra cómo una simple vasija puede ser utilizada para la separación en forma continua de partículas de un diámetro no uniforme de un líquido. El líquido que contiene las citadas partículas se introduce por un extremo del depósito y fluye a una cierta velocidad hasta que rebosa por la salida situada al otro extremo. En este trayecto, las partículas van sedimentando a distintas velocidades, debido a sus diámetros diferentes.

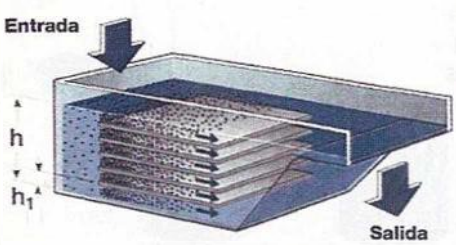


Fig. 6.2.9 *La disposición de aletas de separación horizontales en un recipiente aumenta su capacidad de separación.*

Utilización de pantallas para incrementar la capacidad de separación de un depósito

La capacidad de sedimentación de un depósito puede aumentarse si se incrementa su área total, pero esto supone que el depósito pueda ser muy grande y poco manejable. Como alternativa, es posible incrementar el área disponible de separación insertando unas pantallas horizontales en el depósito, como se aprecia en la Figura 6.2.9.

De esta manera se tiene una serie de "canales de separación", en los cuales la separación de las partículas puede tener lugar a la misma velocidad que en el depósito de la Figura 6.2.8. La capacidad total de la vasija se multiplica por el número de canales de separacion. El área total disponible para la separación, multiplicada por el número de canales de separación, determina la máxima cantidad de líquido que puede fluir a través del envase sin pérdida de eficacia, es decir, sin per-

mitir que partículas del tamaño límite o superiores escapen con el líquido clarificado.

Cuando se procede a la separación en forma continua de una suspensión en un envase con pantallas horizontales, los canales de separación acabarán siendo bloqueados por partículas sedimentadas. Entonces, el proceso se detendrá.

Por el contrario, si el contenedor tiene pantallas inclinadas, como se muestra en la Figura 6.2.10, las partículas que se depositan sobre las mismas, bajo la influencia de la gravedad, irán resbalando hasta caer al fondo de la vasija donde se eliminan.

¿Por qué las partículas que se sedimentan sobre las placas no son barridas por el líquido que fluye entre ellas? La explicación se da en la Figura 6.2.11, que muestra una sección de parte de un canal de separación. Al pasar el líquido entre las pantallas o placas, la capa límite del líquido más cercana a las mismas se ve frenada por fricción de forma que su velocidad cae casi hasta cero.

Esta capa límite estacionaria ejerce una acción de frenado sobre la siguiente, y así sucesivamente, hacia el centro del canal, donde la velocidad es máxima. Se obtiene el perfil de velocidades que se muestra en esa figura, siendo el flujo laminar en dicho canal. Las partículas sedimentadas en esa zona de la capa límite están, por lo tanto, sometidas únicamente a la fuerza de la gravedad.

Se utiliza el área proyectada cuando se calcula el flujo máximo a través de un depósito con pantallas inclinadas.

Con objeto de utilizar al máximo la capacidad de separación de un envase, es necesario instalar la máxima área superficial posible donde se sedimenten las partículas. La distancia de sedimentación no afecta directamente a la capacidad, pero se necesita un mínimo de anchura en los canales, con objeto de evitar que se bloqueen por las partículas sedimentadas.

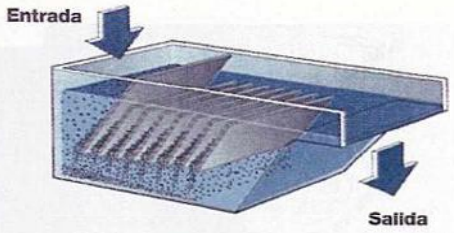


Fig. 6.2.10 *Recipiente de sedimentación con aletas planas inclinadas que provocan un flujo laminar y una caida deslizante de las partículas.*

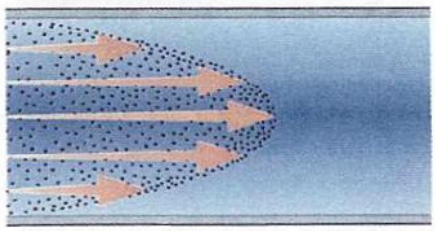


Fig. 6.2.11 *Velocidades de partícula a distintas separaciones de la pared del canal. La longitud de cada flecha se corresponde con la velocidad de la partícula.*

Separación continua de una fase sólida y de dos fases líquidas

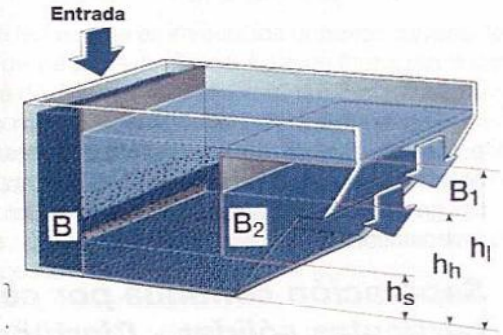


Fig. 6.2.12 *Envase para separación continua de dos fases líquidas mezcladas y sedimentación simultánea de fases sólidas.*
B Entrada
B1 Rebose de salida del líquido más ligero
B2 Aleta que previene que el líquido más ligero salga por la salida del líquido más pesado.

Un dispositivo similar al que se muestra en la Figura 6.2.12 puede ser utilizado para la separación de dos líquidos mezclados por medio de la acción de la gravedad y para la separación de partículas sólidas de esos dos líquidos a la misma vez.

La dispersión baja desde la entrada a través de la abertura B. Una capa de interfase fluye entonces horizontalmente al nivel de B. Desde este nivel las partículas sólidas, que tienen una densidad mayor que la de ambos líquidos, se sedimentan en el fondo del envase. El menos denso de los dos líquidos sube hacia la superficie y rebosa por la salida B_1. El más pesado se precipita hacia el fondo pasando por debajo de la pantalla B_2 hasta que sale. *La pantalla B_2 evita que el liquido más ligero vaya en una dirección errónea.*

Separación por centrifugación

Velocidad de sedimentación

Si un depósito se llena de liquido y se le hace girar se crea un campo de fuerza centrifuga, como se muestra en la Figura 6.2.13. Ello origina una aceleración centrifuga *a*. La aceleración centrífuga no es constante como la aceleración de la gravedad *g* en un envase estacionario. La aceleración centrífuga aumenta con la distancia al eje de rotación (radio r) y con la velocidad de rotación, expresada como velocidad angular w, tal como se indica en la Figura 6.2.14.

La aceleración puede calcularse mediante la fórmula 2):

$$2) \qquad a = r\,\omega^2$$

La fórmula 3) siguiente se obtiene si la aceleración centrífuga, *a*, expresada como rv^2, es sustituida por la aceleración de la gravedad, *g*, en la anteriormente citada ley de Stokes (ecuación 1).

Fig. 6.2.13 *Fuerza centrífuga generada en un envase que se hace girar.*

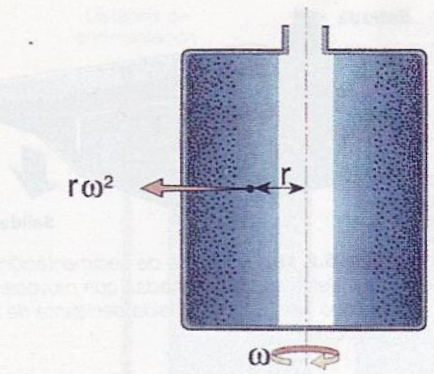


Fig. 6.2.14 *Una separadora simple.*

La ecuación 3) se puede utilizar para calcular la velocidad de sedimentación, v, de cada partícula en la centrífuga.

3) $$V_c = \frac{d^2 (\rho_p - \rho_l)}{18\eta} r\omega^2$$

Velocidad de flotación de un glóbulo de grasa

La ecuación 1) fue utilizada previamente para determinar la velocidad de sedimentación de un glóbulo de grasa de 3 mm de diámetro, que resultó ser de 0.166×10^{-6} m/s o 0.6 mm/h, bajo la influencia de la gravedad.

La ecuación 3) puede ser ahora utilizada para calcular la velocidad de flotación de un glóbulo de grasa con el mismo diámetro, en una posición radial de 0.2 m en una centrífuga, girando a una velocidad de n = 5.400 rpm.

La velocidad angular se puede calcular como

$$w = \frac{2\pi \times n}{60} \text{ rad/s (radianes por segundo)}$$

rad/s (radianes por segundo) donde 2π = una revolución y
n = revoluciones por minuto (rpm)
con una velocidad de rotación (n) de 5.400 rpm la velocidad angular (ω) será:
ω = 564.49 rad/s
La velocidad de sedimentación (v) será entonces:

$$V = \frac{(3 \times 10^{-6})^2 \times 48}{18 \times 1.42 \times 10^{-3}} \times 0.2 \times 564.49^2 = 0.108 \times 10^{-2} \text{ m/s}$$

es decir, 1.08 mm/s ó 3.896 mm/h.

Dividiendo la velocidad de sedimentación en un campo de fuerzas centrífugas por la velocidad de sedimentación correspondiente a un campo gravitacional, se obtiene la eficacia de la separación centrífuga, comparada con la sedimentación por gravedad. La velocidad de sedimentación en la centrífuga es 3.896/0.6, aproximadamente 6.500 veces más rápida.

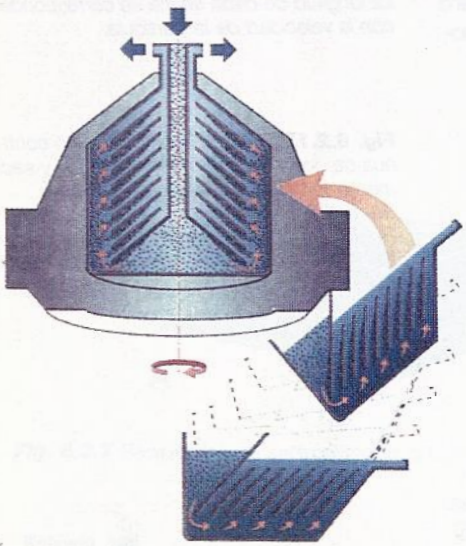


Fig. 6.2.15 *El envase con aletas se puede girar 90° y hacer rotar, dando lugar así a un tambor giratorio de una centrífuga para separación continua de partículas sólidas de la leche.*

Separación continua por centrifugación de partículas sólidas - Clarificación

La Figura 6.2.15 muestra una centrífuga para la separación en régimen continuo de partículas sólidas contenidas en un líquido. Esta operación se denomina clarificación. Imaginemos el envase de sedimentación de la Figura 6.2.10 girado 90° y girando alrededor del eje de rotación. El resultado es la sección de una separadora centrífuga.

Canales de separación

La Figura 6.2.15 muestra que la centrífuga tiene unas pantallas insertadas en forma de discos cónicos. Con éstos se aumenta el área disponible para la sedimentación. Los discos descansan unos sobre otros y forman un conjunto, conocido como paquete de discos. Unas bandas radiales o distanciadores se sueldan a los discos, manteniéndolos a la distancia correcta. Con ello se forman canales de separación. El espesor de los distanciadores determina la amplitud de los canales.

La Figura 6.2.16 muestra cómo el líquido entra en el canal por el borde exterior (radio r_1) y sale por el interior (radio r_2), continuando hacia la salida de la máquina. Durante el paso de los canales, las partículas sedimentan y son arrastradas hacia fuera del disco, la zona que constituye el límite superior de los citados canales.

La velocidad w del líquido no es la misma en todas las partes del canal. Varía desde casi cero para el líquido más cercano a los discos, hasta un valor máximo en el centro del canal. La fuerza centrífuga actúa sobre todas las partículas, forzándolas hacia la periferia de la máquina a la velocidad de sedimentación v. Como consecuencia, una partícula se mueve simultáneamente a la velocidad w con el líquido y a la velocidad de sedimentación v, de forma radial hacia la periferia.

Clarificación = separación de partículas sólidas de un líquido.

La velocidad resultante v_p es la suma de estos dos movimientos. La partícula se mueve en la dirección indicada por la flecha del vector v_p. (Con objeto de simplificar se supone que la partícula se mueve en linea recta siguiendo la línea de trazos que aparece en la figura).

Para que pueda ser separada, la partícula debe sedimentar sobre la placa superior antes de alcanzar el punto B', es decir, con un radio igual o superior a r_2. Una vez que la partícula ha sedimentado, la velocidad del líquido en la superficie del disco es tan pequeña, que la partícula ya no vuelve a ser arrastrada por dicho líquido. Entonces, resbala hacia fuera, por la cara inferior del disco, bajo la influencia de la fuerza centrifuga, saliendo por el borde B y depositándose en la pared periférica del tambor de la centrífuga.

La partícula límite

La particula límite es aquella de un diámetro tal que si comienza en la posición más desfavorable, es decir, el punto A de la Figura 6.2.17, alcanzará justamente el disco superior en el punto B'. Todas las partículas mayores que la partícula límite podrán ser separadas.

Esa misma figura muestra que algunas partículas, de menores dimensiones que la límite, serán también separadas si entran en el canal por el punto C, situado entre A y B. Cuanto menor sea dicha partícula, más cerca deberá estar C de B con objeto de conseguir su separación.

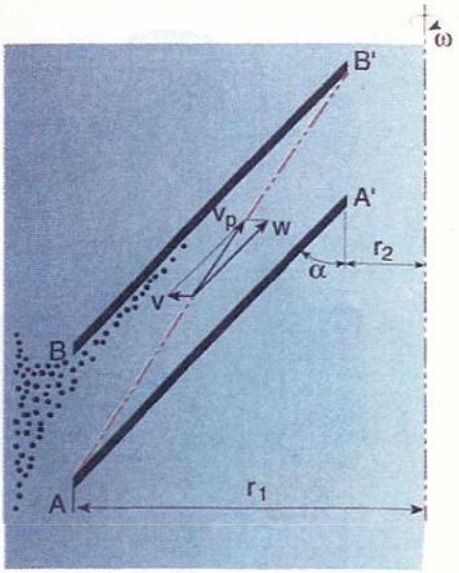


Fig. 6.2.16 *Diagrama simplificado de un canal de separación donde se indica cómo se mueve una partícula en el líquido durante la separación.*

Separación centrífuga continua de la leche

Clarificación

En una clarificadora centrifuga de leche, ésta es introducida entre los canales de separación por el borde exterior del paquete de discos, fluye de forma radial por el interior de los canales hacia el eje de rotación y abandona dichos canales a través de una salida axial superior, tal como se ilustra en la Figura 6.2.18. En su camino a través de los canales, las impurezas sólidas son separadas y arrojadas por los lados inferiores de los discos hacia la periferia del rotor de la clarificadora. Allí se reúnen en el espacio previsto para los sedimentos. Al pasar la leche a lo largo de la anchura radial total de los discos, el tiempo que tarda en hacerlo permite también la separación de partículas muy pequeñas. La diferencia más típica entre una clarificadora centrífuga y una separadora está en el diseño del paquete de discos -la clarificadora no tiene orificios de distribución- y el número de salidas -la clarificadora una y la separadora dos.

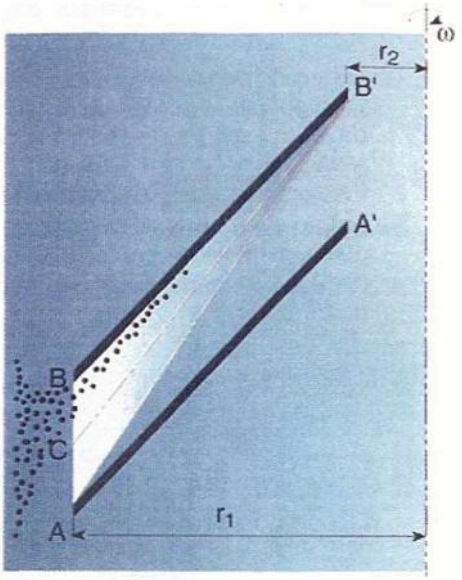


Fig. 6.2.17 *Todas las partículas mayores que la partícula límite se separarán si se localizan en la zona sombreada.*

Separación

En una separadora centrífuga el paquete de discos está equipado con unos orificios de distribución alineados verticalmente. La Figura 6.2.19 muestra de forma esquemática cómo se produce la separación de los glóbulos de grasa de la leche en el paquete de discos de una centrifuga desnatadora. En la Figura 6.2.20 se ilustra de forma más detallada este fenómeno.

La leche se introduce a través de orificios de distribución alineados de forma vertical en los discos y situados a una cierta distancia del borde del paquete. Bajo la influencia de la fuerza centrífuga, los sedimentos y los glóbulos de grasa de la leche comienzan a sedimentar de forma radial, tanto hacia dentro como hacia fuera, en los canales de separación, según la densidad relativa con respecto al medio continuo (leche desnatada).

Como en la clarificadora, las *impurezas sólidas de mayor densidad* presentes en la leche sedimentarán rápidamente hacia fuera, dirigiéndose a la periferia de la centrífuga y siendo recogidas en la cámara de lodos. La sedimentación de dichos sólidos se ve beneficiada por el hecho de que la leche desnatada en los canales, en este caso, también se mueve hacia la periferia del paquete de discos.

La *nata*, es decir, los glóbulos de grasa, tienen una *densidad menor* que la leche desnatada y, por lo tanto, se *mueven por el interior* de los canales hacia el eje de rotación. La nata continúa hasta salir por una abertura axial.

La *leche desnatada se mueve hacia el espacio exterior* al paquete de discos y desde allí, por un canal situado entre la parte superior del paquete y el bastidor cónico del rotor de la centrífuga, hacia la salida concéntrica de leche desnatada.

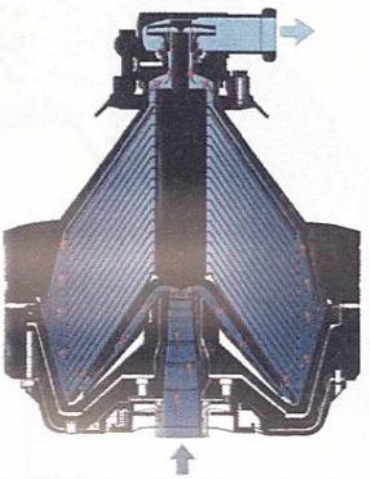


Fig. 6.2.18 *La leche entra en el paquete de discos desde la periferia del rotor de una clarificadora centrífuga, y fluye hacia dentro a través de los canales.*

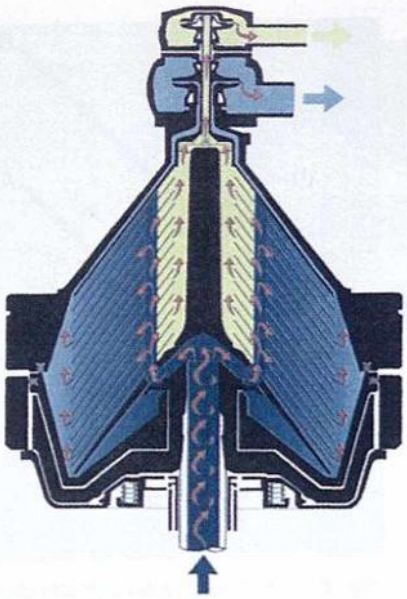


Fig. 6.2.19 *La leche entra en el paquete de discos del rotor de una separadora centrífuga, a través de los orificios de distribución.*

El tamaño de los glóbulos de grasa varía durante el período de lactación de la vaca, desde el parto hasta que la vaca queda seca. Los glóbulos más grandes tienden a predominar justo después del parto, mientras que aumenta el número de pequeños glóbulos hacia el final del período de lactación.

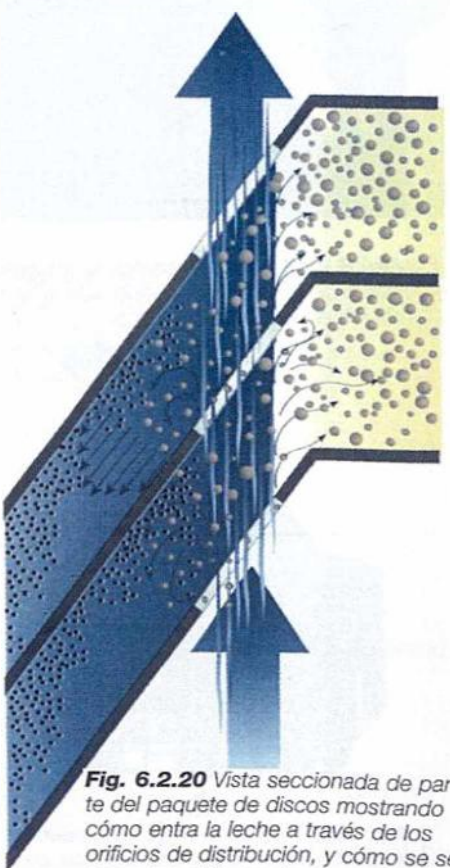


Fig. 6.2.20 *Vista seccionada de parte del paquete de discos mostrando cómo entra la leche a través de los orificios de distribución, y cómo se separan los glóbulos de grasa de la leche desnatada.*

Eficiencia en el desnatado

La cantidad de grasa que puede ser separada de la leche depende del diseño de la separadora, del caudal de paso de la leche a través de la misma, y de la distribución de tamaños de los glóbulos de grasa.

Los glóbulos de grasa más pequeños, normalmente < 1 μm, no tienen tiempo de ser separados al caudal especificado, por lo que salen junto con la leche desnatada. El contenido de grasa que aún permanece en la leche desnatada se sitúa normalmente entre el 0.04 y el 0.07 %, y la capacidad de desnatado de la máquina se representa por esas cifras (0.04-0.07).

La velocidad de flujo de la leche a través de los canales de separación se verá disminuida si se reduce el caudal de leche que pasa por la máquina. Esto hace que los glóbulos de grasa tengan más tiempo para sedimentarse y ser descargados a través de la salida de la nata. Consecuentemente, la capacidad de desnatado de una separadora aumenta al reducir el caudal, y viceversa.

Contenido graso de la nata

La leche entera que entra en la centrífuga sale dividida en dos corrientes distintas: leche desnatada y nata, representando esta última aproximadamente un 10% del caudal total. La proporción descargada como nata determina el contenido graso de la misma. Si la leche entera contiene un 4% de grasa y su caudal es de 20.000 l/h, la cantidad total de grasa que pasa por la separadora centrífuga será de

$$\frac{4 \times 20.000}{100} = 800 \text{ l/h.}$$

Supongamos que se desea obtener una nata con un contenido en grasa del 40%. Esta cantidad de grasa se tiene que encontrar diluida con una cierta proporción de leche desnatada. La cantidad total de líquido descargado con un 40% de nata será de

$$\frac{800 \times 100}{40} = 2\,000 \text{ l/h.}$$

de los cuales 800 l/h serán de grasa pura y los restantes 1.200 l/h de "leche desnatada".

La colocación de válvulas de regulación en las salidas de nata y leche desnatada hace posible que se puedan ajustar los volúmenes relativos de ambos productos con objeto de obtener el contenido de grasa requerido en la nata.

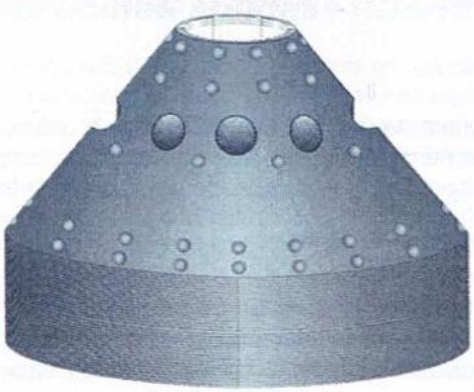


Fig. 6.2.21 *Paquete de discos mostrando los orificios de distribución.*

Expulsión de los sólidos

Los sólidos recogidos en el espacio destinado a los mismos existente en la centrífuga constan de partículas de suciedad, células de la ubre, corpúsculos blancos (leucocitos), corpúsculos rojos de la sangre, bacterias, etc. El total de sedimentos contenidos en la leche varía, pero es normalmente del orden de 1 kg/10.000 litros. El volumen de la cámara de lodos varía entre 10 y 20 litros dependiendo del tamaño de la separadora.

En las separadoras de leche, del tipo de retención de sólidos, es necesario desmontar manualmente el rotor y limpiar la cámara de lodos a intervalos relativamente frecuentes. Para ello se necesita efectuar un trabajo manual duro y pesado.

Las modernas separadoras autolimpiables o de eyección de sólidos van equipadas de un dispositivo para la expulsión automática de los lodos acumulados, a intervalos prefijados. De esta forma se elimina la necesidad de una limpieza ma-

nual. En un epígrafe posterior de este capítulo titulado el "sistema de descarga" se trata a fondo este tema.

En la separación de la leche, la expulsión de los sólidos se realiza normalmente a intervalos de 30 a 60 minutos.

Diseño básico de las desnatadoras centrífugas

Si se secciona una separadora autolimpiable, como se ve en las Figuras 6.2.25 y 6.2.26, se aprecia que el tambor está compuesto por dos partes principales, el cuerpo y la carcasa. Se mantienen unidas ambas partes por medio de un anillo tórico atornillado. El paquete de discos está sujeto entre la carcasa y el distribuidor del centro del tambor rotatorio.

Las centrífugas modernas son de dos tipos: semiabiertas y herméticas.

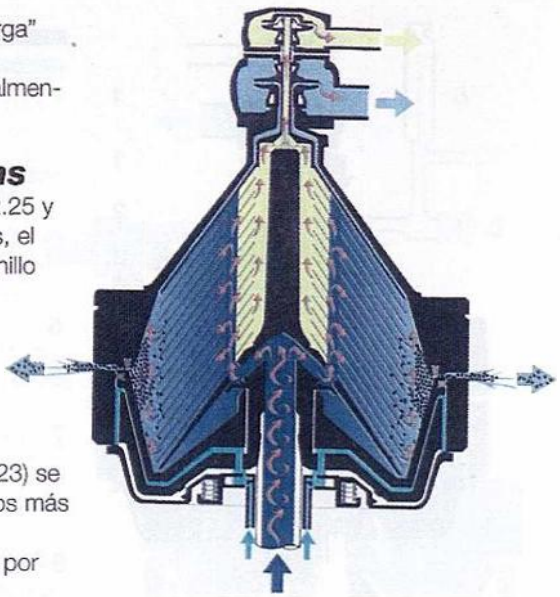


Fig. 6.2.22 Eyección de los sólidos mediante cortas aperturas de la cámara de lodos situada en la periferia del rotor.

Diseño semiabierto

Las separadoras centrífugas con discos centrípetos en la salida (Figura 6.2.23) se conocen como del tipo semiabierto (que contrastan con los modelos abiertos más antiguos con descarga por rebose).

En las centrífugas semiabiertas, la leche entra al tambor de la centrífuga por una entrada superior a través de una entrada tubular axial estacionaria.

Cuando la leche entra en el distribuidor (1) con nervios longitudinales, es acelerada hasta alcanzar la velocidad de rotación del rotor, antes de pasar por los canales de separación del paquete de discos (2). La fuerza centrífuga empuja la leche hacia afuera formando un anillo con una superficie interior cilíndrica. Se encuentra en contacto con aire a presión atmosférica, lo que quiere decir que la presión de la leche en la superficie es también igual a la atmosférica. La presión aumenta progresivamente al incrementarse la distancia al eje de rotación, llegando a un máximo en la periferia del rotor.

Las partículas sólidas más pesadas se sedimentan en la parte más exterior y son llevadas hasta la cámara de lodos. La nata se mueve hacia la parte más interior junto al eje de rotación y pasa a través de canales hacia la cámara de salida de la nata (3). La leche desnatada sale del paquete de discos por el extremo más exterior y pasa entre el disco superior y la carcasa hasta la cámara de salida de la leche desnatada (4).

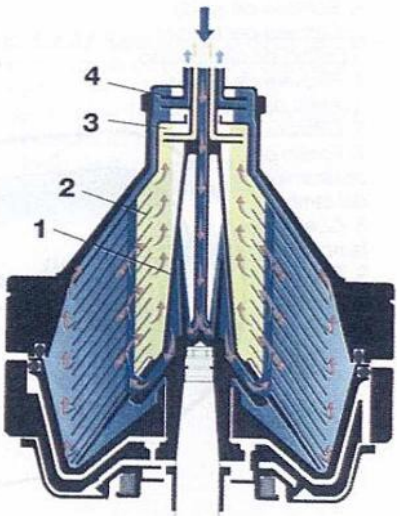


Fig. 6.2.23 Separadora autolimpiable semiabierta (con disco centrípeto).
1. *Distribuidor*
2. *Paquete de discos*
3. *Cámara del disco centrípeto de la nata*
4. *Cámara del disco centrípeto de la leche desnatada*

Disco centrípeto

En las centrífugas semiabiertas, la nata y la leche desnatada salen a través de unos dispositivos especiales, llamados discos centrípetos, uno de los cuales se muestra en la Figura 6.2.24. Debido al diseño de estos dispositivos de salida, las separadoras semiabiertas se denominan usualmente separadoras de discos centrípetos.

Los bordes de los discos centrípetos estacionarios están empotrados en las columnas rotatorias de líquido, lo que continuamente provoca un *rallado* de una cierta cantidad. En estos discos, la energía cinética del líquido que gira es convertida en presión, y la presión es siempre igual a la caida de presión en la línea de salida.

Un incremento de la presión de salida implica que el nivel del líquido en el cuerpo de la centrífuga se mueva hacia dentro. De esta forma, los efectos del estrangulamiento de las salidas son automáticamente contrarrestados. Con el fin de prevenir la aireación del producto es importante que los discos centrípetos estén suficientemente cubiertos de líquido.

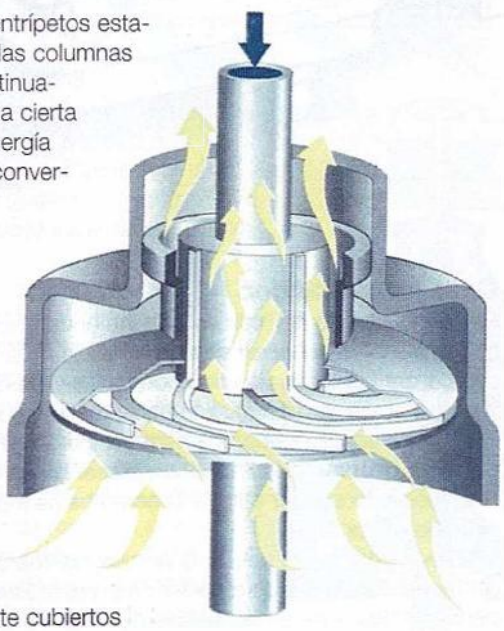


Fig. 6.2.24 La salida del disco centrípeto se sitúa en la parte superior del tambor semiabierto.

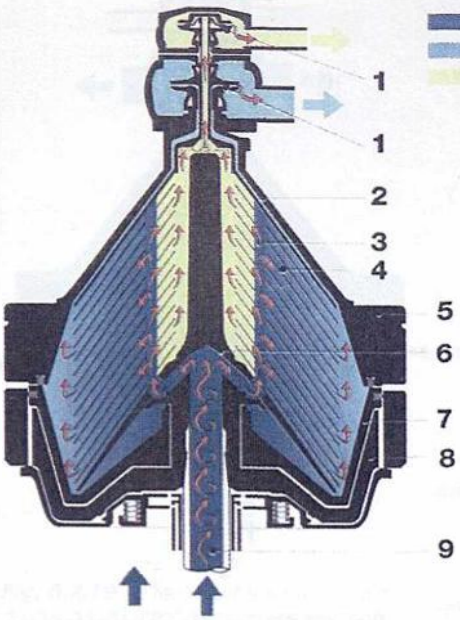


Fig. 6.2.25 *Sección del tambor con indicación de las distintas salidas de una separadora hermética moderna.*
1. Bombas de salida
2. Carcasa del tambor
3.Orificio de distribución
4. Paquete de discos
5. Anillo de cierre
6. Distribuidor
7. Fondo de deslizamiento del tambor
8. Cuerpo del tambor
9. Eje hueco del tambor

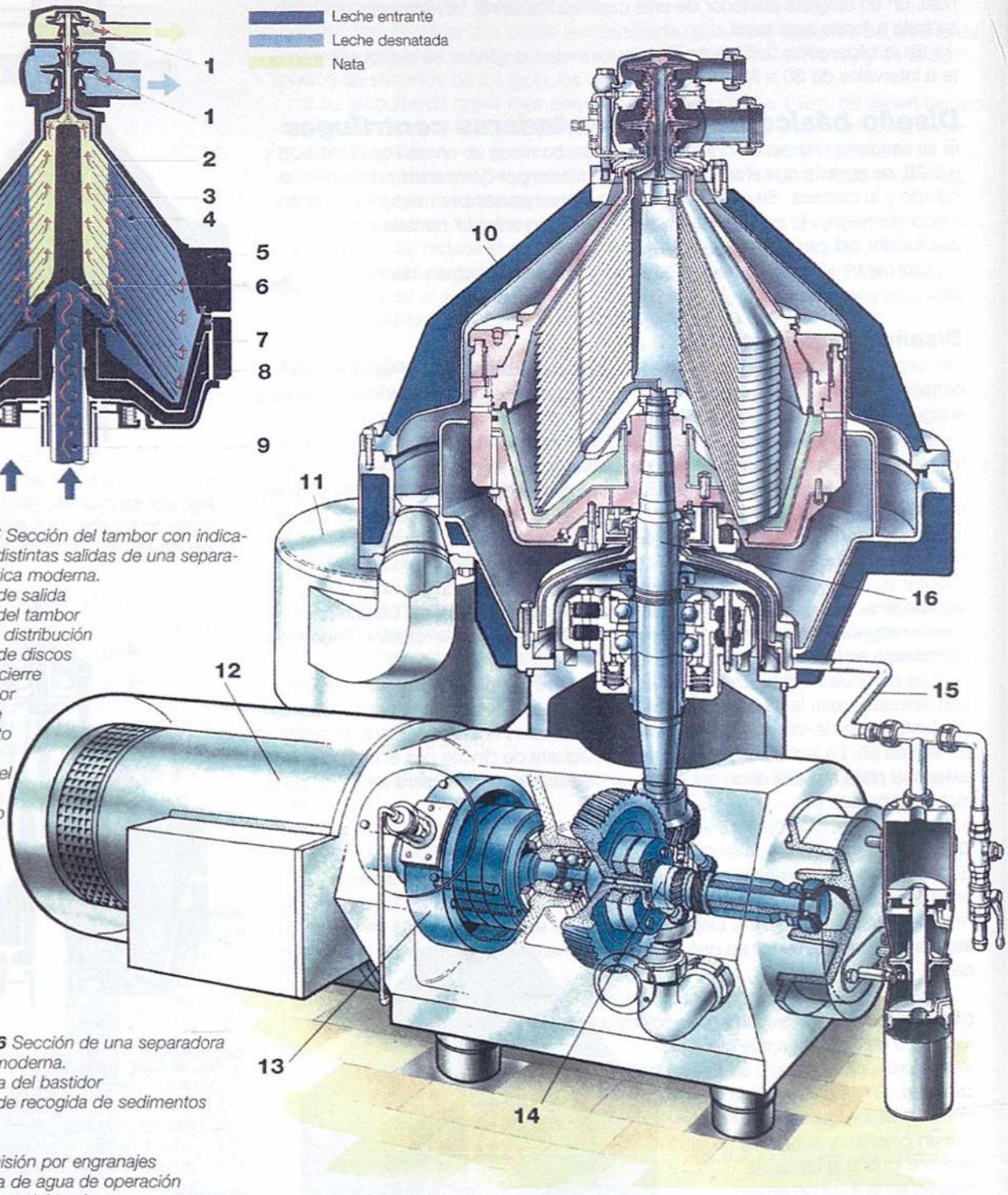


Fig. 6.2.26 *Sección de una separadora hermética moderna.*
10. Carcasa del bastidor
11. Ciclón de recogida de sedimentos
12. Motor
13. Freno
14. Transmisión por engranajes
15. Sistema de agua de operación
16. Eje hueco del tambor.

Diseño hermético

En las centrífugas herméticas la leche entra al rotor de la máquina por la parte inferior, a través de un canal situado en el eje. Al entrar al rotor, la leche es acelerada hasta alcanzar la misma velocidad de rotación del tambor pasando entonces a través de los orificios de distribución hasta el paquete de discos.

El rotor de una centrífuga hermética está completamente lleno de leche durante la fase de operación. No existe presencia de aire en el centro de la misma. Por ello, se puede considerar a la separadora hermética como una parte de un sistema cerrado de tuberías.

La presión generada por la bomba externa de producto es suficiente para vencer la resistencia al flujo a través de la separadora y suministrar una presión suficiente de descarga en las salidas de la nata y la leche desnatada. El diámetro del rodete de la bomba se puede dimensionar para conseguir la necesaria presión de salida.

Control del contenido en grasa de la nata

Separadora de disco centrípeto

El volumen descargado de nata por la separadora de disco centrípeto se controla por medio de una válvula de estrangulamiento en la salida de nata. Si se abre gradualmente la válvula, cantidades mayores de nata saldrán de la misma, con un contenido en grasa que irá disminuyendo progresivamente.

A cada caudal de descarga le corresponde un determinado contenido graso en la nata. Si la leche entera tiene un 4% de grasa y se quiere obtener una nata con el 40%, el caudal de descarga de nata debe ser ajustado a 2.000 l/h (de acuerdo con los cálculos hechos anteriormente). La presión en la salida de la leche desnatada (ref. 1 en la Figura 6.2.27) debe entonces fijarse en un determinado valor, por medio de una válvula de regulación, que varía de acuerdo con la centrífuga y con el caudal. Entonces, la válvula de estrangulamiento (2) en la salida de la nata se ajusta para dar el caudal correspondiente, necesario para conseguir el contenido en grasa buscado.

Cualquier cambio en la descarga de la nata será contrarrestado por otro igual y de signo contrario en la descarga de leche desnatada. Por ello, se instala una unidad automática de presión constante en la salida de la leche desnatada, con objeto de mantener la contrapresión constante a la salida, independientemente de los cambios en el caudal de la nata.

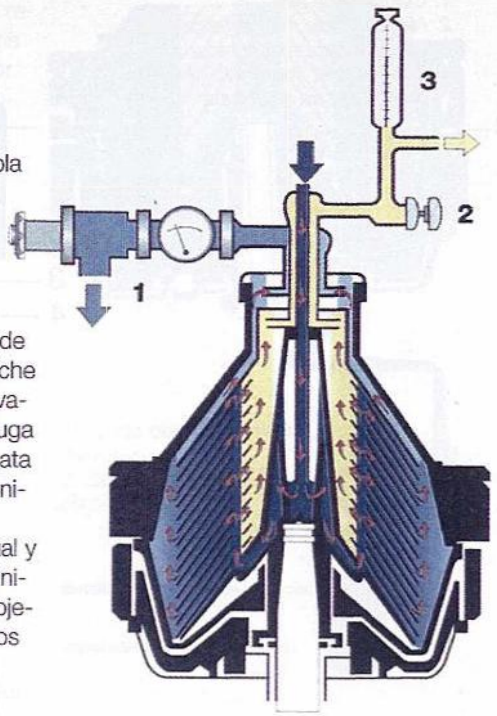


Fig. 6.2.27 *Separadora de disco centrípeto con dispositivos de control manual en las salidas.*
1. Salida de leche desnatada con válvula de regulación de presión
2. Válvula de regulación de nata
3. Caudalímetro de nata

Caudalímetros para la nata

En las separadoras de discos centrípetos, el volumen descargado de nata se controla por medio de una válvula de nata (2) dotada de un caudalímetro (3). La apertura de la válvula se ajusta con un tornillo y el flujo estrangulado pasa a través de un tubo de vidrio graduado. El tubo contiene un flotador especial en forma de cucharilla, que es levantado por el caudal de nata hasta una posición determinada en la escala graduada, que varía según el caudal y la viscosidad de la nata.

Analizando el contenido en grasa de la leche entera entrante y calculando el volumen de la corriente de nata con el contenido requerido de grasa, es posible determinar de forma aproximada el caudal y ajustar el tornillo de estrangulamiento de forma adecuada. Un ajuste más fino se puede hacer cuando el contenido en grasa de la nata ha sido analizado. El operador conoce entonces la lectura del flotador cuando el contenido en grasa de la nata es correcto.

El contenido en grasa de la nata viene afectado por variaciones del contenido en grasa de la leche entera entrante y por variaciones de caudal en la línea. Se pueden utilizar otros tipos de instrumentos, como por ejemplo los sistemas automáticos en-línea para medir el contenido en grasa de la nata en combinación con sistemas de control que mantienen el contenido en grasa en un valor contante.

Separadoras herméticas

En la Figura 6.2.28 se muestra una unidad automática de presión constante para una separadora hermética. La válvula que se muestra es una válvula de diafragma de forma que la presión requerida en el producto se ajusta por medio de aire comprimido que actúa sobre la parte superior del diafragma.

Durante la separación el diafragma es afectado por la presión de aire constante que actúa sobre la parte superior y la presión del producto (leche desnatada) que actúa en la parte inferior del diafragma. La presión prefijada de aire forzará que el diafragma caiga si la presión de la leche desnatada desciende. El asiento de la válvula, que está unido al diafragma, entonces se mueve hacia bajo y reduce el caudal. Este estrangulamiento incrementa la presión de salida de la leche desnatada hasta un valor preestablecido. La reacción contraria tendrá lugar cuando se tenga un incremento de la presión de la leche desnatada, restaurándose de nuevo la presión prefijada.

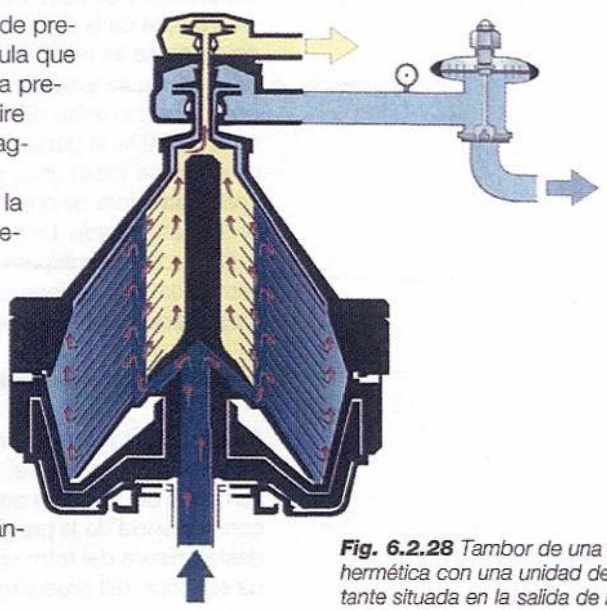


Fig. 6.2.28 *Tambor de una separadora hermética con una unidad de presión constante situada en la salida de la leche desnatada.*

1. Columna de aire
2. Nivel de nata màs exterior
3. Nivel de nata más interior
4. Nivel para el contenido de grasa que se desea en la nata

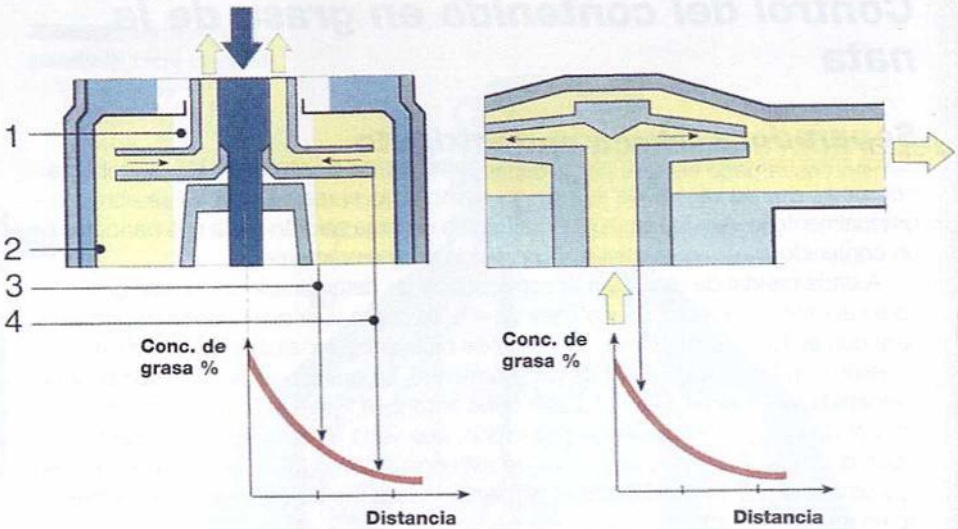


Fig. 6.2.29 *Salida de nata en un disco centrípeto y en una separadora hermética, con indicación de las correspondeidentes concentraciones de grasa en la nata a diferentes distancias.*

Diferencias de comportamiento en las salidas de las separadoras de discos centrípetos y herméticas

La Figura 6.2.29 es un esquema simplificado de las salidas de nata de una separadora de discos centrípetos y de una separadora hermética. Se pone de manifiesto una diferencia importante entre estas dos máquinas. En las separadoras de discos centrípetos el diámetro exterior del disco centrípeto puede penetrar en la columna de líquido que gira. La distancia viene determinada por el contenido en grasa de la nata. El contenido en grasa es más alto en los puntos más cercanos al eje central de la separadora. Desde allí el contenido en grasa se reduce gradualmente conforme se aumenta el diámetro.

Si se aumenta el contenido en grasa de la nata saliente de la separadora se aumenta la distancia desde la parte más interior, que se corresponde con la superficie libre de la nata, hasta la periferia más exterior del disco centrípeto, de forma que se fuerza al nivel de la nata hacia dentro. El contenido de grasa en la parte más interior, de la superficie libre de la nata, debe ser considerablemente mayor si se descarga, por ejemplo, una nata con un 40% de contenido en grasa. La nata debe estar sobreconcentrada -hasta un nivel más alto de contenido en grasa- con respecto a la nata saliente de la separadora. Esto puede dar lugar a una destrucción de los glóbulos de grasa en la zona más interior que se encuentra en contacto con una columna de aire, como consecuencia de una fricción creciente. Se daría lugar a una disrupción de los glóbulos de grasa que causarían problemas de adherencia y se aumentaría la sensibilidad a la oxidación y a la hidrólisis.

La nata de la separadora hermética es extraida por el centro, donde el contenido en grasa es más alto. Por lo tanto una sobreconcentración no es necesaria.

Cuando se extrae nata que tiene un elevado contenido en grasa la diferencia de comportamiento de la salida es incluso más importante. Cuando se tiene una nata del 72%, la grasa se encuentra concentrada hasta tal punto que los glóbulos de grasa se tocan unos a otros. Esta concentración sería imposible de obtener en una separadora de discos centrípetos, ya que la nata tendría que obtenerse muy sobreconcentrada. La presión necesaria no puede ser conseguida en una separadora de disco centrípeto. Una presión elevada puede ser creada en la separadora hermética, lo que hace posible que se pueda separar nata con un contenido de grasa superior al 72% de grasa globular.

El sistema de descarga

Producción y limpieza CIP

Durante la separación el fondo más interior del cuerpo rotatorio, el fondo de deslizamiento del rotor, se comprime sobre el anillo de sellado de la carcasa como consecuencia de la presión hidráulica del agua inferior. La posición del fondo de deslizamiento del rotor viene determinado por la diferencia de presión entre la capa superior, del producto, y la del fondo, del agua.

Los sedimentos del producto y las soluciones CIP se recogen en el espacio reservado para ello (cámara de lodos) situado en la parte más interior de la periferia del rotor, hasta que se realiza una descarga. Para limpiar las superficies del rotor de las grandes centrífugas se descarga un mayor volumen de lodos y líquido durante el enjuagado con agua del ciclo de limpieza.

Descarga

La secuencia de descarga de lodos puede ser establecida por un reloj con tiempos preestablecidos, por un sensor de algún tipo instalado en el proceso, o manualmente presionando un botón.

Los detalles de la secuencia de descarga varían según el tipo de centrífuga, pero básicamente se añade un volumen fijo de agua para iniciar el drenaje del "agua de maniobra". Cuando el agua se drena del espacio inferior el fondo de deslizamiento del rotor se abre instantáneamente y los lodos pueden escapar a la periferia del rotor. A continuación se suministra automáticamente nueva agua de maniobra para cerrar el cuerpo del rotor, procedente de la red de agua, presionándose el fondo de deslizamiento del rotor para ajustar el anillo de cierre. La descarga de lodos tiene lugar en décimas de segundo.

El bastidor de la centrífuga absorbe la energía de los lodos que salen del rotor. Los lodos son descargados del bastidor por gravedad hasta un sumidero, un envase o una bomba.

Unidades motoras

En una separadora de leche el rotor se monta sobre un eje vertical soportado por un conjunto de rodamientos superiores e inferiores. En la mayoría de las centrífugas el eje vertical está conectado con el eje del motor por medio de una rueda dentada, colocada sobre un eje horizontal que comunica una velocidad apropiada, y una transmisión. Existen distintos tipos de acoplamientos indirectos (por fricción), pero se prefiere normalmente el acoplamiento directo con secuencia de arranque controlada.

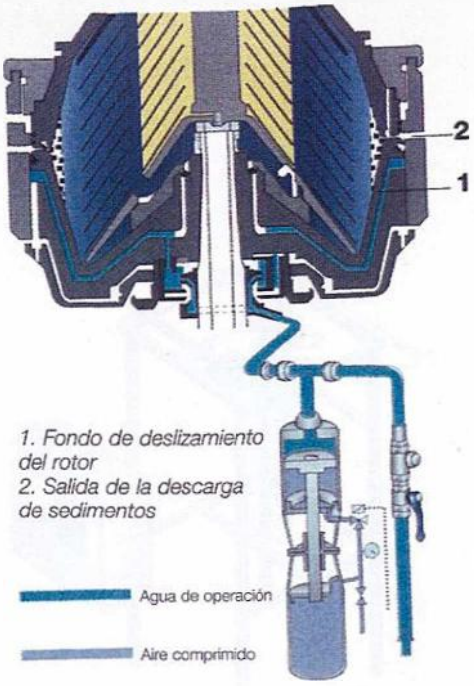


Fig. 6.2.30 *Un sistema de válvulas suministra agua de operación a la separadora con el fin de garantizar un adecuado comportamiento de la descarga.*

Normalización del contenido en grasa de la leche y la nata

Métodos de cálculo de mezclas de productos

La normalización del contenido en grasa implica el ajuste del contenido en grasa de la leche, o de un producto lácteo, por medio de la adición de nata o leche desnatada de forma apropiada para obtener el contenido de grasa deseado.

Existen distintos métodos para el cálculo de las cantidades de los productos con diferentes contenidos de grasa que han de ser mezclados para obtener un contenido final de grasa dado. Estos abarcan las mezclas de leche entera con leche desnatada, nata con leche entera, nata con leche desnatada y leche desnatada con grasa de leche anhidra (GLA).

Uno de estos métodos, utilizado frecuentemente, se ha tomado del libro "Dictionary of Dairying" de J.G. Davis, y se ilustra con el siguiente ejemplo:

¿Cuántos kg de nata con un contenido graso de A% deben ser mezclados con leche desnatada con un contenido de grasa B% para obtener una mezcla que contenga C% de grasa? La respuesta se obtiene de un rectángulo, que se muestra en la Figura 6.2.31, donde se indican las cifras de grasa dadas.

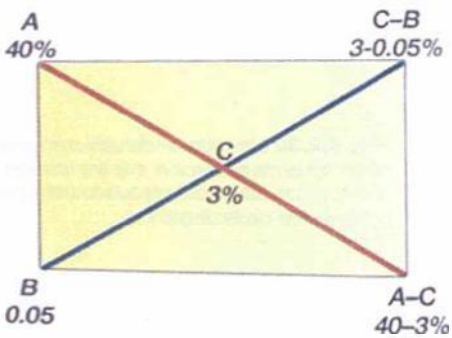


Fig. 6.2.31 *Cálculo del contenido en grasa del producto C.*

A	Contenido de grasa de la nata	40%
B	Contenido de grasa de la leche desnatada	0.05%
C	Contenido de grasa del producto final	3%

Se restan los contenidos de grasa de las diagonales para obtener C - B = 2.95% y A - C = 37.

La mezcla es entonces de 2.95 kg de nata al 40% y 37 kg de leche desnatada con un 0.05% para obtener 39.95 kg de un producto estandarizado (normalizado) que contendrá un 3% de grasa.

A partir de las ecuaciones que se indican más abajo también será posible calcular las cantidades de A y B necesarias para obtener la cantidad deseada (X) de C.

1) $\frac{X \times (C-B)}{(C-B) + (A-C)}$ kg de A

2) $\frac{X \times (A-C)}{(C-B) + (A-C)}$ kg de B

[también (X - ecuación 1)]

Principio de la normalización

La nata y la leche desnatada que salen de una separadora tienen un contenido de grasa constante si todos los demás parámetros permanecen constantes. El principio en el que se basa la normalización -se realice de manera manual o automática se ilustra en la Figura 6.2.32.

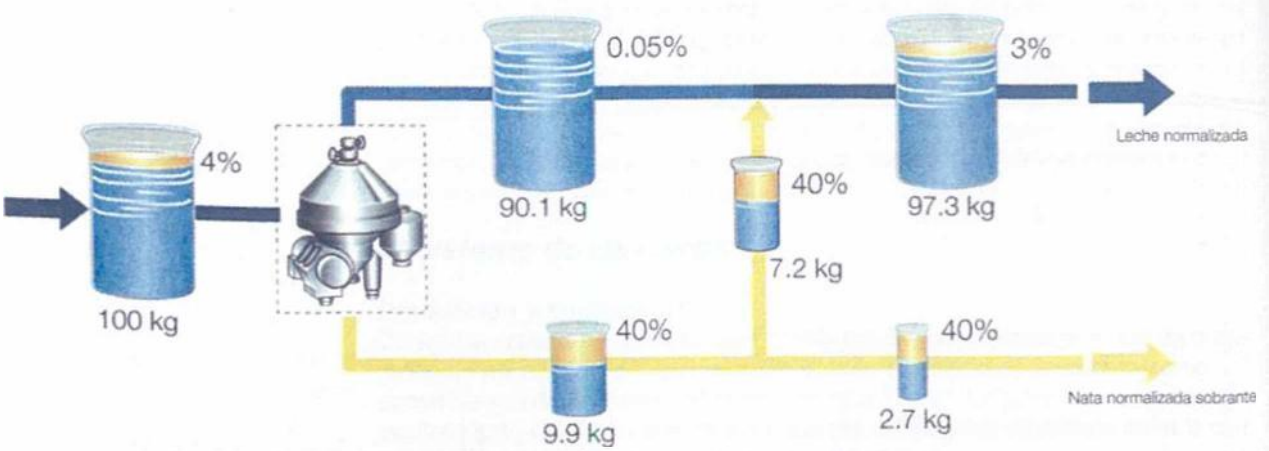


Fig. 6.2.32 *Principio de la normalización de la grasa.*

Las cifras que se indican en la figura se basan en el tratamiento de 100 kg de leche entera con un contenido de grasa del 4%. El objetivo es producir una cantidad óptima de leche normalizada al 3% y nata sobrante con un contenido de grasa del 40%.

La separación de 100 kg de leche entera rinde 90.35 kg de leche desnatada con un 0.05% de grasa y 9.65 kg de nata con un 40% de grasa.

La cantidad de nata al 40% que se debe añadir a la leche desnatada es de 7.2 kg. Esto da 97.55 kg de leche comercial con un 3% de grasa, sobrando 9.65 - 7.2 = 2.45 kg de nata al 40%. El principio se ilustra en la Figura 6.2.32.

Normalización directa automática

En las plantas modernas de procesado de la leche con un amplio abanico de productos, la normalización directa se combina normalmente con la separación de leche. Antiguamente, la normalización se hacía manualmente, pero conforme ha ido incrementándose la capacidad de producción se han hecho cada vez más necesarios los métodos de normalización más rápidos, más constantes y más correctos, e independientes de las fluctuaciones correspondientes a la distintas épocas del año en cuanto al contenido en grasa de la leche cruda. Las válvulas de control, caudalímetros y densímetros y un lazo de control por ordenador se utilizan para ajustar el contenido en grasa de la leche y la nata a los valores deseados. Este equipamiento normalmente viene montado en unidades compactas, tal como se muestra en la Figura 6.2.33.

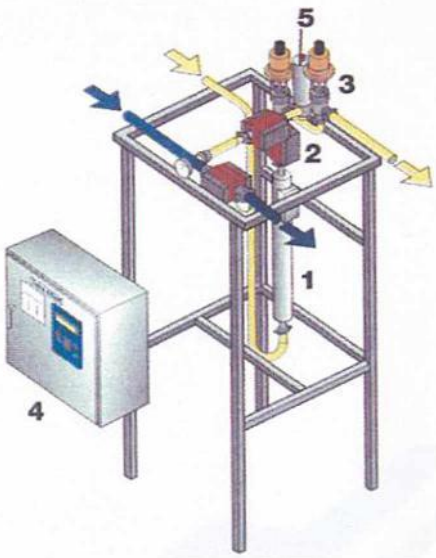


Fig. 6.2.33 *Los sistemas directos de normalización continuos se montan en unidades compactas de proceso.*
1. Transmisor de densidad
2. Transmisor de caudal
3. Válvula de control
4. Panel de control
5. Válvula de corte

La presión de la leche desnatada saliente se debe de mantener constante con el fin de facilitar una normalización precisa. Esta presión debe ser mantenida frente a las fluctuaciones de caudal o caidas de presión causadas por el equipo instalado después de la separadora. Esto se hace con una válvula de presión constante colocada cerca de la salida de la leche desnatada.

Para conseguir una adecuada precisión de proceso es necesario medir los siguientes parámetros variables:

- fluctuaciones en el contenido graso de la leche entrante;
- fluctuaciones en el caudal,
- fluctuaciones en la temperatura de precalentamiento.

La mayoria de estas variables son interdependientes. Por otro lado, cualquier desviación en una etapa del proceso produce a menudo otras desviaciones en todas las etapas restantes. El contenido en grasa de la nata puede ser regulado hasta cualquier valor dentro del rango de comportamiento de la separadora, con una desviación estandar basada en la repetibilidad entre 0.2 - 0.3% de grasa. Para la leche normalizada, la desviación estandar basada en la repetibilidad debe ser menor que 0.03%.

Normalmente, la mayor parte de la leche entera se calienta hasta 55-65ºC en el pasteurizador antes de ser separada. Después de la separación la nata es normalizada a un contenido de grasa preestablecido y después, la cantidad calculada de nata que se destinará a la normalización de la leche (leche comercial, leche para fabricación de queso, etc.) se envía para ser mezclada con una adecuada cantidad de leche desnatada. La nata sobrante se lleva al pasteurizador de nata. El curso de las distintas fases del proceso se ilustra en la Figura 6.2.34.

Bajo ciertas circunstancias también es posible aplicar un sistema de normalización contínuo (en-línea) sobre una leche fría saliente de la separadora centrífuga.

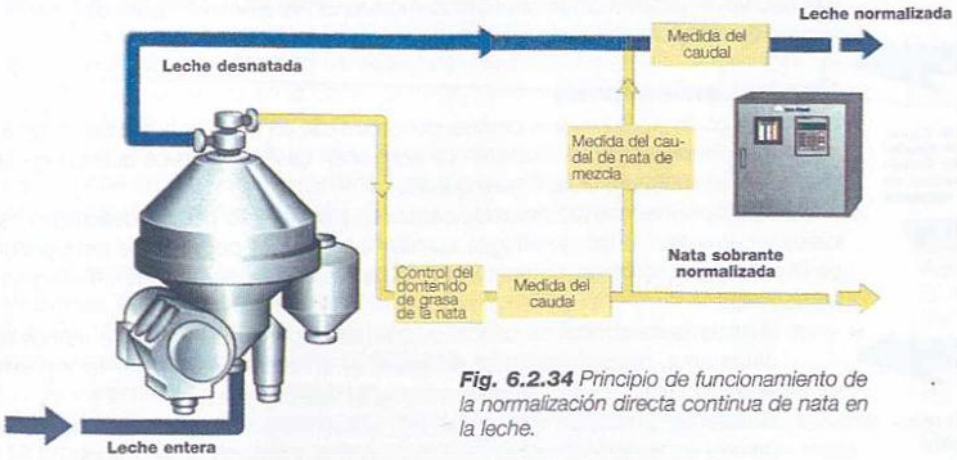


Fig. 6.2.34 *Principio de funcionamiento de la normalización directa continua de nata en la leche.*

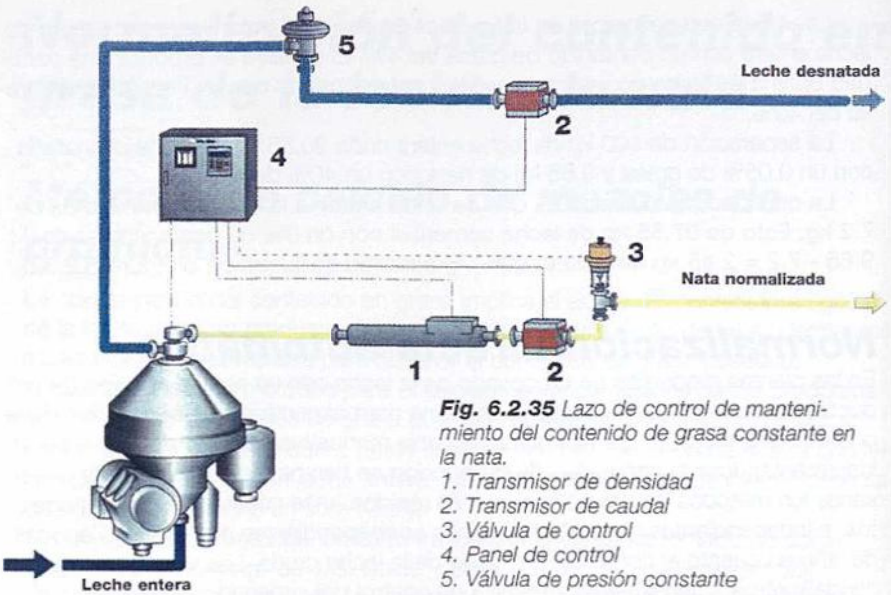


Fig. 6.2.35 *Lazo de control de mantenimiento del contenido de grasa constante en la nata.*
1. Transmisor de densidad
2. Transmisor de caudal
3. Válvula de control
4. Panel de control
5. Válvula de presión constante

Sin embargo, en este caso será importante que todas las fracciones de la grasa de la leche se mantengan suficiente tiempo a baja temperatura (10 - 12 horas) para conseguir una completa cristalización. La razón es que la densidad variará mucho según el grado de cristalización por lo que deteriora la precisión de la medida del transmisor de densidad, que se calibrará siempre en las condiciones que prevalecen después de haber sido instalado.

Sistema de control del contenido en grasa de la nata

El contenido en grasa de la nata en la salida de la separadora centrifuga viene determinado por el caudal de dicha nata. El contenido en grasa de la nata es inversamente proporcional al caudal que se obtiene. Por ello, algunos sistemas de normalización utilizan caudalímetros para controlar el porcentaje en grasa. Este es el método más rápido y, mientras que la temperatura y el contenido graso en la leche antes de la separación sean constantes, es también el más preciso. El contenido graso será erroneo si cambian los parámetros mencionados.

Para la medida en continuo del contenido graso de la nata se pueden utilizar diferentes tipos de instrumentos. Una señal procedente del instrumento ajusta el caudal de nata de forma que se obtenga el contenido graso correcto. Este método es preciso, pero sensible a las variaciones en temperatura y contenido graso de la leche. Sin embargo, el control es lento y se necesita un periodo relativamente largo de tiempo para que el sistema vuelva al contenido correcto de grasa, después de haberse producido una perturbación.

En la Figura 6.2.35 se puede ver que se tienen dos transmisores que miden el caudal de nata normalizada y el caudal de leche desnatada. Con estos dos datos de caudal el sistema de control (4) calcula el caudal de leche entera que entra a la separadora. Un transmisor de densidad (1) mide la densidad de la nata y convierte este valor en contenido de grasa. Combinando los datos de contenido de grasa y el caudal, el sistema de control actúa modulando la válvula (3) para obtener el contenido de grasa deseado en la nata.

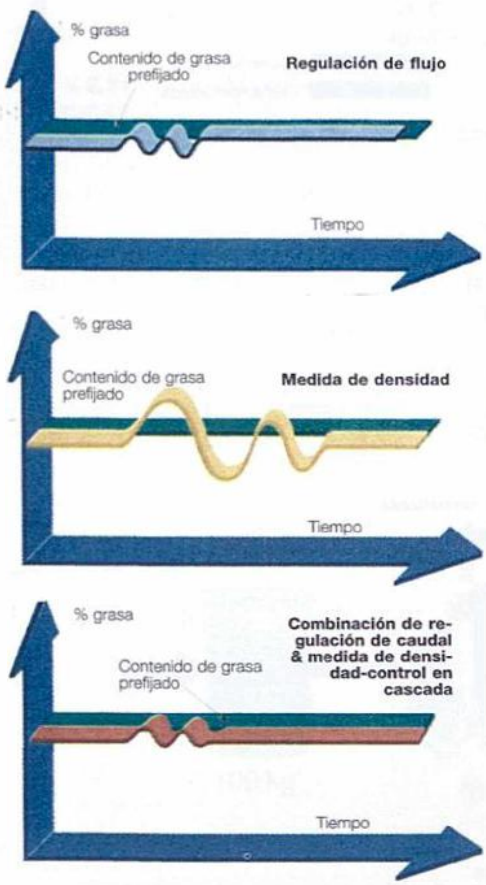


Fig. 6.2.36 *Diferencias de tiempo de reacción entre diferentes sistemas de control.*

Control en cascada

La combinación de la medida precisa del contenido en grasa y la rápida medida del caudal, manejada en un sistema de control en cascada, ofrece buenas ventajas, tal como se ilustra en la Figura 6.2.36.

Cuando ocurren perturbaciones, causadas por ejemplo por las descargas parciales recurrentes de las centrífugas autolimpiables o por cambios de temperatura de la nata o por cambios del contenido de grasa de la leche entrante, el diagrama muestra que:

- el sistema de control de caudal, actuando sólo, reacciona más o menos rapidamente, pero el contenido de grasa de la nata se desvía del valor preestablecido una vez que se restaura la estabilidad;
- el sistema de medida de la densidad, actuando sólo, reacciona lentamente, pero el contenido de grasa de la nata vuelve al valor preestablecido;

- cuando los dos sistemas se combinan en un sistema de control en cascada, se consigue un rápido retorno a los valores preestablecidos.

El sistema de control en cascada por lo tanto da lugar a menores pérdidas de producto y consigue una mayor precisión. El ordenador monitoriza el contenido de grasa de la nata, el caudal de nata y la posición de la válvula de regulación de la nata.

El transmisor de densidad (ref. 1 en la Figura 6.2.35) instalado en el circuito mide la densidad de la nata continuamente (masa por unidad de volumen, en kg/m^3 por ejemplo), que es inversamnente proporcional al contenido de grasa ya que el contenido de grasa de la nata tiene una menor densidad que el suero de la leche. El transmisor de densidad transmite lecturas continuas de densidad al ordenador en forma de señal eléctrica. La intensidad de la señal es proporcional a la densidad de la nata. Aumentos de densidad implican una disminución del contenido en grasa de la nata, y aumentos de intensidad de señal.

Cualquier cambio que se produzca en la densidad modifica la señal del transmisor al ordenador, es decir, el valor medido se desviará del valor fijado programado en el ordenador. El ordenador responde cambiando la señal de salida a la válvula de regulación en la cantidad correspondiente a la desviación existente entre el valor medido y el valor prefijado. Entonces, la válvula de regulación cambia su posición y hace que la densidad (contenido en grasa) vuelva a su valor correcto.

El transmisor de caudal (ref 2 en la Figura 6.2.35) en el circuito de control mide el flujo de nata, de forma continua, y transmite una señal al ordenador. Los transmisores en el circuito de control (Figura 6.2.35) miden el caudal y la densidad en la linea de nata continuamente y transmiten una señal al ordenador.

El control en cascada se utiliza para llevar a cabo las correcciones necesarias debido a las variaciones de contenido de grasa en la leche entera entrante. El sistema de control en cascada trabaja comparando:

- el caudal medido por el transmisor de caudal. (El caudal es proporcional al contenido en grasa de la nata) y
- la densidad medida por el transmisor de densidad (la densidad se considera proporcional al contenido en grasa de la nata).

El ordenador en el panel de control (4) calcula entonces el contenido actual de grasa de la leche entera y controla las válvulas de control para hacer los ajustes necesarios.

La normalización de la leche en contenido en grasa se registra de forma continua.

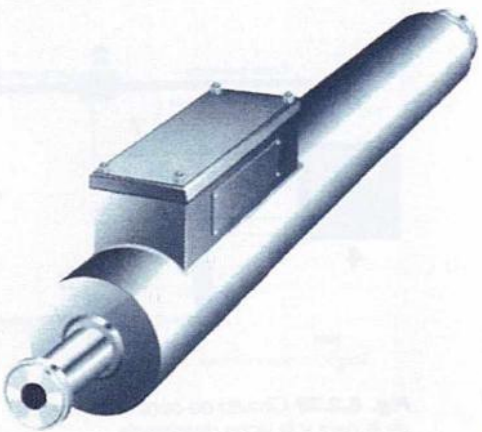


Fig. 6.2.37 *Transmisor de densidad.*

Control del contenido graso por medio de la medida de la densidad

La medida del contenido en grasa de la nata se basa en la relación fija existente entre la densidad y el porcentaje en grasa. El contenido en grasa varía inversamente con la densidad, ya que la grasa de la nata es más ligera que el suero de la leche.

En este contexto es importante también recordar que la densidad de la nata se ve afectada por la temperatura y el contenido de gas. Un contenido elevado de gas, que es la fase más ligera de la leche, seguido de la fase nata, reducirá la densidad de la nata. Es por tanto importante que la cantidad de gas de la leche se mantenga en un nivel constante. La leche contendrá siempre más o menos cantidad de gas (incluyendo el aire). Como cifra promedio se puede considerar un contenido de gas en la leche del 6%. Un excesivo contenido de gas provocará imprecisiones en la medida de caudales volumétricos de la leche, aumentando además la tendencia al ensuciamiento de superficies de intercambio, etc. Sobre este tema, sobre el aire contenido en la leche, se habla también en el capítulo 6.6: Desaireadores.

La manera más simple y más común de eliminar el aire de la leche es mantener la leche cruda durante al menos una hora en un tanque (silo) antes de ser procesada. De otra forma, se tendrá que instalar un desaireador antes de la separadora.

La densidad de la nata se reduce si aumenta la temperatura de separación, y viceversa. El transmisor de densidad puede equiparse con un sensor de temperatura (Pt 100) para indicar la temperatura actual al módulo de control, para compensar moderadas variaciones de temperatura de separación.

El transmisor de densidad mide continuamente la densidad y la temperatura del líquido. Su principio de operación se puede asemejar a un diapasón. Conforme se producen cambios de densidad en el producto, se generan cambios de masa

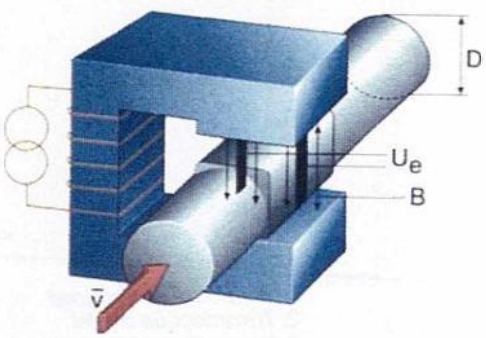


Fig. 6.2.38 *Transmisor de caudal.*
U_e = KxBxvxD
donde
U_e = voltaje en el electrodo
K = constante del instrumento
B = Resistencia del campo magnético
v = velocidad media
D = Diámetro de la tubería

que vibra, y por lo tanto se generan cambios de frecuencia resonante. Las señales de valor de densidad se transmiten al módulo de control.

El transmisor de densidad consiste simplemente en un tubo recto a través del cual fluye el líquido. El tubo vibra debido a que está dentro de un campo electromagnético creado en el exterior, que está conectado al instrumento y de aquí a la red de tuberías por medio de fuelles.

El transmisor de densidad se instala como parte de la red de tuberías y es tan ligero que no precisa de un soporte especial.

Transmisor de caudal

Se utilizan diversos tipos de medidores para el control del caudal. Los medidores electromagnéticos (Figura 6.2.38) no tienen partes moviles que se puedan desgastar. Por ello se emplean con frecuencia, ya que no necesitan mantenimiento. No hay diferencias de precisión entre los medidores.

El cabezal de medida consta de una tubería y de dos bobinas magnéticas. Se origina un campo magnético perpendicular a la tubería de medida cuando se aplica una corriente a las bobinas.

Cuando un líquido conductor fluye a través de la tubería, se induce y se mide un voltaje eléctrico por medio de dos electrodos montados en dicha tubería. Este voltaje es proporcional a la velocidad media del producto en la tubería y, por lo tanto, a su caudal volumétrico.

El transmisor de flujo contiene un microprocesador que controla el transformador de corriente que mantiene un campo magnético constante. El voltaje de los electrodos de medida se transmite, vía amplificador y convertidor de señal, al microprocesador existente en el panel de control.

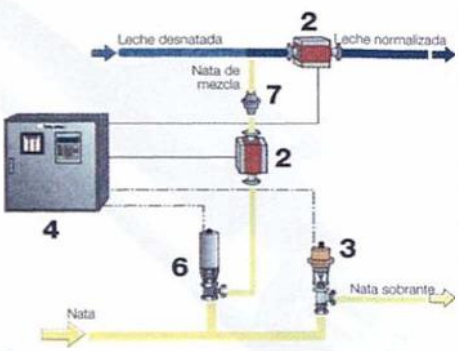


Fig. 6.2.39 *Circuito de control de mezcla de la nata y la leche desnatada.*
2. Transmisor de caudal
3. Válvula de control
4. Panel de control
6. Válvula de corte
7. Válvula antirretorno

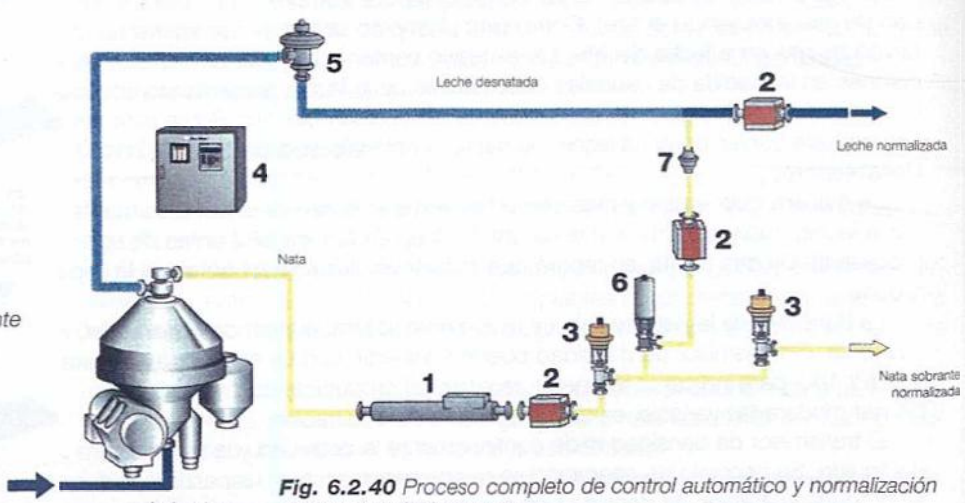
Válvula de regulación de caudal para nata y leche desnatada

El microprocesador compara la señal del valor medido procedente del transmisor de densidad con una señal de referencia prefijada. Si el valor medido se desvía del valor prefijado, el ordenador modifica la señal de salida hacia la válvula de regulación (ref. 3 en la Figura 6.2.35) colocada en la linea después del transmisor de densidad, y reajusta la apertura de la válvula citada para que se altere el caudal de nata procedente de la centrifuga, de tal forma que el contenido en grasa de la misma sea el correcto.

Circuito de control del mezclado de la nata

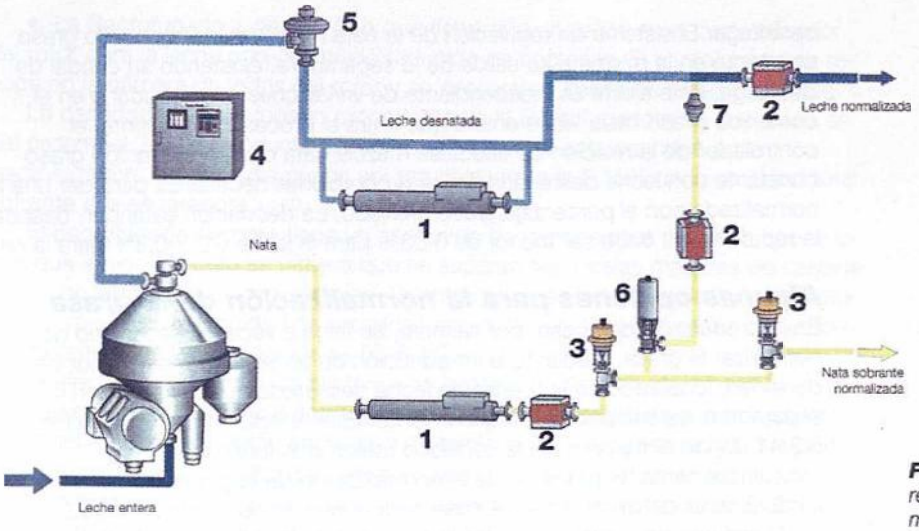
El circuito de control que se muestra en la Figura 6.2.39 controla la cantidad de nata que debe mezclarse de forma continua con la leche desnatada para obtener el contenido graso requerido en la leche normalizada. Este circuito contiene dos transmisores de flujo (2). Uno se encuentra en la línea de nata que va a ser mezclada, y el otro en la linea de leche normalizada, después del punto de mezcla.

Las señales procedentes de ambos transmisores de flujo se envían al microcomputador, que genera una relación (o ratio) entre ambas señales. Entonces, el ordenador compara el valor medido de dicha relación con un valor de referencia prefijado y transmite una señal a la válvula de regulación en la línea de nata.



1. Transmisor de densidad
2. Transmisor de caudal
3. Válvula de control
4. Panel de control
5. Válvula de presión constante
6. Válvula de corte
7. Válvula antirretorno

Fig. 6.2.40 *Proceso completo de control automático y normalización directa de la leche y nata.*



1. *Transmisor de densidad*
2. *Transmisor de caudal*
3. *Válvula de control*
4. *Panel de control*
5. *Válvula de presión constante*
6. *Válvula de corte*
7. *Válvula antirretorno*

Fig. 6.2.41 *Sistema de normalización de la relación grasa/SNG (caseína) con un densímetro extra en la línea de leche desnatada.*

Un contenido demasiado bajo en la leche normalizada quiere decir que se está mezclando poca cantidad de nata. La relación entre las señales procedentes de los transmisores de flujo será entonces menor que la relación de referencia, y la señal de salida del ordenador a la válvula de regulación cambiará. La válvula cierra, creando una elevada pérdida de carga y una mayor presión que hace que entre más nata en la línea de mezcla. Esto afecta a la señal que llega al ordenador y el ajuste se sigue produciendo de forma continua, asegurando la mezcla de la cantidad correcta de nata. La señal eléctrica de salida del ordenador es convertida en una señal neumática que llega a la válvula controlada neumáticamente.

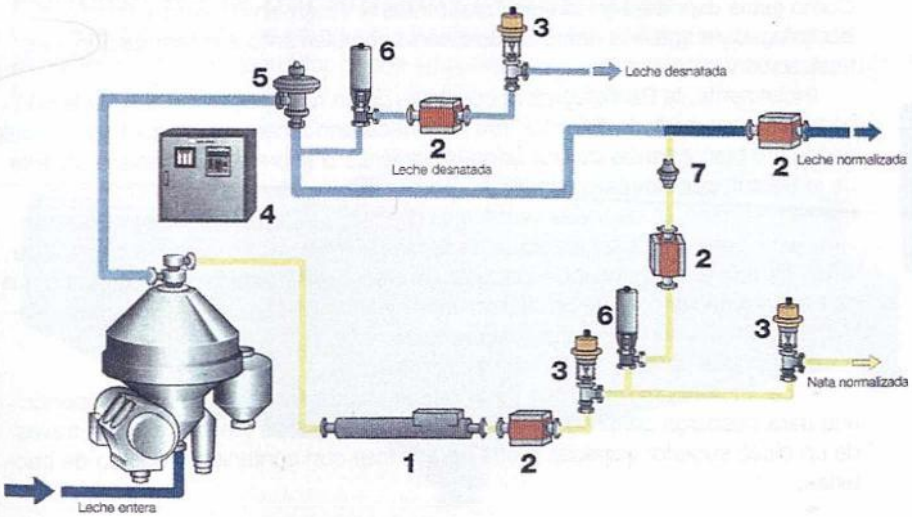
La mezcla se realiza basándose en valores constantes conocidos de contenido en grasa de la leche desnatada y de la nata. El contenido en grasa se regula normalmente hasta un valor constante comprendido entre 35 y 40% en la nata, y el contenido de grasa en la leche desnatada se determina por medio de la eficacia de desnatado de la separadora.

El control preciso de la densidad, combinado con un control de presión constante en la salida de la leche desnatada, asegura la consecución de las condiciones necesarias para el control de la mezcla. La nata y la leche desnatada se mezclarán en las proporciones exactas para conseguir el contenido graso prefijado en la leche normalizada, incluso si el caudal a través de la centrífuga cambia o si varía el contenido en grasa de la leche entera entrante.

El transmisor de caudal y la válvula de regulación en el circuito de mezcla de nata son del mismo tipo que los utilizados en el circuito de control del contenido de grasa.

El proceso completo de normalización directa

La Figura 6.2.40 muestra el proceso completo para la normalización automática y directa de la leche. El sistema de control de presión a la salida de la leche desnatada (5) hace que ésta sea constante, independientemente de las fluctuaciones en las pérdidas de carga producidas en los equipos que siguen a la



1. *Transmisor de densidad*
2. *Transmisor de caudal*
3. *Válvula de control*
4. *Panel de control*
5. *Válvula de presión constante*

Fig. 6.2.42 *Normalización de leche en un contenido de grasa más alto que la leche entrante.*

centrífuga. El sistema de regulación de la nata mantiene un contenido graso constante en la misma a su salida de la separadora, ajustando su caudal de descarga. Este ajuste es independiente de variaciones en el caudal o en el contenido graso de la leche entera que entra al proceso. Finalmente, el controlador de la relación de caudales mezcla nata con un contenido graso constante con leche desnatada en las proporciones necesarias para dar una leche normalizada con el porcentaje graso prefijado. La desviación estándar, basada en la repetibilidad, debe ser menor de 0.03% para la leche y 0.2-0.3% para la nata.

Algunas opciones para la normalización de la grasa

En la producción de queso, por ejemplo, se tiene a veces la necesidad de normalizar la grasa. Mediante la introducción de un segundo transmisor de densidad, localizado en la tubería de leche desnatada que conecta con la separadora, se satiface este requerimiento. Este arreglo se ilustra en la Figura 6.2.41 donde el transmisor de densidad realiza dos funciones:

1. Incrementar la precisión de la normalización de la grasa.
2. El valor de densidad es la base para el cálculo del contenido SNG.

El sistema de control convierte la densidad de la leche desnatada en contenido SNG, un valor que es a continuación utilizado en el control de la relación de grasa/SNG.

Si por otro lado el contenido de grasa de la leche entrante es más baja que el contenido especificado para la leche normalizada, la instrumentación se soluciona como se muestra en la Figura 6.2.42.

Un volumen calculado de leche desnatada se desvía de la corriente saliente de la separadora y el volumen remanente se mezcla con la nata.

Hay que indicar que la leche desnatada sobrante caliente debe ser recogida, enfriada y pasteurizada tan pronto como sea posible.

Otras opciones son también posibles, como la adición de nata (nata de suero) de conocido contenido graso, que se necesita a veces en la normalización de leche que se destina a la fabricación de queso. Con el fin de utilizar la nata obtenida de la separación de suero, el volumen correspondiente de nata ordinaria se "sangra". Este arreglo permite que la nata de mejor calidad sea utilizada en la producción de mantequilla de calidad y distintos tipos de nata, como la nata montada.

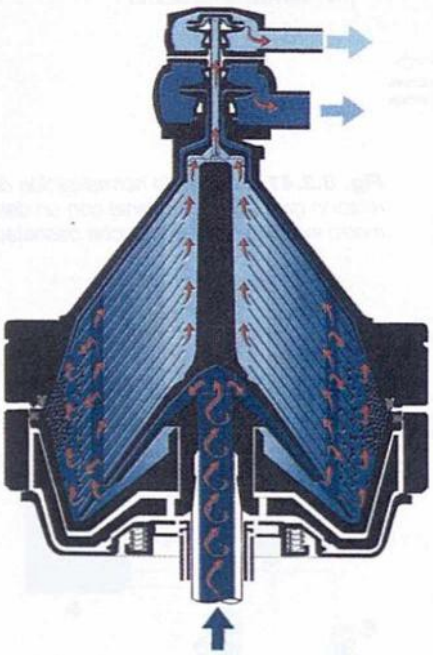


Fig. 6.2.43 *Rotor de una Bactofugadora de dos fases para descarga continua de bactofugado.*

La Bactofugadora®

La bactofugación es un proceso en el que se utiliza una centrífuga especialmente diseñada llamada Bactofugadora para la eliminación de microorganismos presentes en la leche.

Inicialmente, la Bactofugadora se desarrolló para mejorar la calidad de mantenimiento de la leche comercial. Actualmente, la bactofugación se utiliza también para mejorar la calidad bacteriológica de la leche destinada a la fabricación de otros productos como queso, leche en polvo y suero para alimentos infantiles.

Las bacterias, y especialmente las esporas resistentes al calor, tienen una densidad significativamente más alta que la leche. Entonces, una Bactofugadora es un medio particularmente eficiente para limpiar la leche de esporas de bacterias. Como estas esporas son también resistentes al tratamiento térmico, la Bactofugadora aparece como un adecuado complemento a la termización, pasteurización y esterilización.

Inicialmente, la Bactofugadora constaba de un rotor sólido de centrífuga con boquillas en la periferia del rotor. Era muy necesario tener un flujo continuo de fase pesada, o bien a través de una boquilla periférica o sobre la fase pesada saliente de la Bactofugadora, para conseguir una separación eficiente. Esto era posiblemente necesario en las viejas centrífugas de rotor sólido con paredes cilíndricas verticales, pero en las separadoras modernas autolimpiables con una cámara de lodos situada en el exterior del paquete de discos, las bacterias y las esporas pueden ser recogidas durante un determinado período de tiempo y se descargan intermitentemente a intervalos preestablecidos.

Existen dos tipos de Bactofugadoras modernas:

- La Bactofugadora *de dos fases* que tiene dos salidas en la parte superior: una para descarga contínua de concentrado de bacterias (bactofugado) a través de un disco superior especial, y otra para la fase con contenido reducido de bacterias.

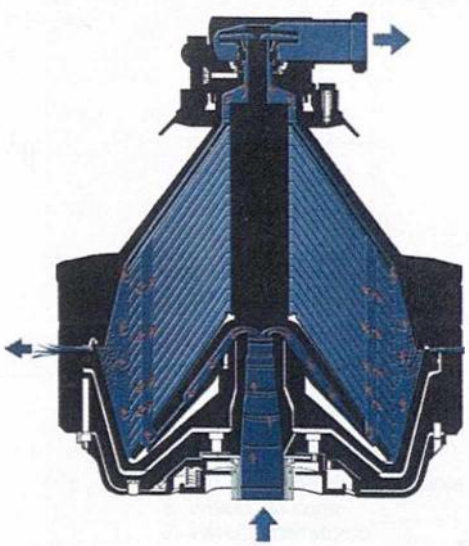


Fig. 6.2.44 *Rotor de una Bactofugadora de una fase para descarga intermitente de bactofugado.*

• La Bactofugadora *de una fase* que tiene sólo un salida en la parte superior del rotor para la leche con contenido reducido de bacterias. El bactofugado se recoge en la cámara de lodos del rotor y se descarga a intervalos preestablecidos.

La cantidad de bactofugado procedente de la Bactofugadora de dos fases es del orden del 3% del producto entrante, mientras que esta cantidad en la Bactofugadora de una fase puede ser tan baja como el 0.15% de la cantidad total entrante a la separadora.

El bactofugado siempre tiene un contenido de materia seca más alto que la leche que lo origina. Esto se debe a que se separan las micelas mayores de caseina junto con las bacterias y las esporas. Cuanto mayor es la temperatura de bactofugación mayor es la cantidad de proteinas presentes en el bactofugado. La temperatura óptima de bactofugación es 55-60°C.

El efecto de reducción de bacterias se expresa en %.

Las bacterias pertenecientes al género *Clostridium* -bacterias anaerobias formadoras de esporas- están entre las más temidas por los queseros, ya que pueden causar el hinchamiento del queso incluso aunque se presenten en pequeño número. Esta es la razón por la que se bactofuga la leche destinada a la fabricación de queso.

Los arreglos para integrar la bactofugación en la planta de pasteurización de la leche para fabricación de queso se discuten en el capítulo 14: Queso.

Decantadoras centrífugas

Las centrífugas se utilizan en la industria láctea para recuperar productos especiales como la caseina precipitada y la lactosa cristalizada. Sin embargo, las clarificadoras centrífugas de rotor de discos anteriormente descritas no se aconsejan para estas tareas debido al elevado contenido de sólidos del producto a separar.

Los tipos más frecuentemente utilizados son centrífugas de cesta sanitarias y las decantadoras centrífugas (Figura 6.2.45). Las decantadoras, que tienen un funcionamiento contínuo, tienen muchas aplicaciones. Se utilizan también, por ejemplo, en plantas de producción de leche de soja a partir de habas de soja, y unos modelos especialmnete adaptados son ampliamente utilizados para eliminar agua de los lodos en plantas de tratamiento de aguas residuales.

Una decantadora centrífuga es una máquina que provoca la sedimentación contínua de los sólidos en suspensión en el líquido por medio de la acción de la fuerza centrífuga en un tambor rotatorio alargado. La característica que distingue la decantadora de otros tipos de centrífugas es que está equipada con un transportador de tornillo axial para la descarga continua de los sólidos separados en el rotor. El transportador gira en la misma dirección que el tambor rotor pero a una velocidad menor para provocar un efecto de "corrimiento". Otras características propias de la decantadora son:

1. El tambor rotor es conicocilíndrico, relativamente delgado, y dispuesto sobre un eje horizontal.
2. Se tiene flujo a contracorriente con la descarga de sólidos por el extremo más estrecho y la descarga de la fase líquida por el extremo más amplio.

Una decantadora centrífuga es una máquina que consigue la sedimentación continua de sólidos en suspensión de un líquido por acción de la fuerza centrífuga en un tambor alargado, rotatorio y horizontal.

Función de la decantadora centrífuga

La suspensión a tratar se introduce a través de un tubo de entrada a la zona de alimentación del transportador donde se acelera y se dirige hacia el interior del rotor que gira (Figura 6.2.46).

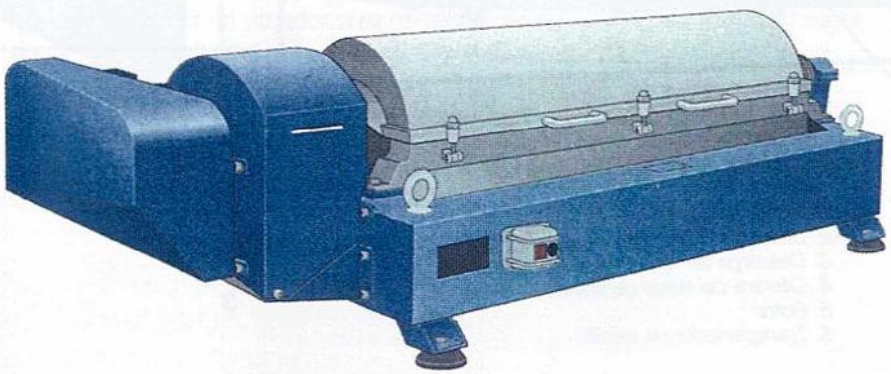


Fig. 6.2.45 *Decantadora centrífuga.*

Los sólidos, que tendrán un peso específico mayor que el líquido, se depositan en la pared interior del tambor rotor casi instantáneamente debido a la intensa aceleración centrífuga (normalmente en el rango 2.000 - 4.000 g) dando lugar a un anillo central de líquido claro.

Descarga de los sólidos

La fase compacta de sólidos se transporta axialmente hacia el extremo estrecho del tambor rotor por medio del transportador interior de tornillo, que se obliga a girar a una velocidad diferente que el rotor. De camino hacia la descarga los sólidos se separan del líquido por medio de las aletas del transportador de tornillo hacia la parte seca. En esta parte se produce la precipitación de los sólidos mientras que el líquido va hacia la salida del mismo. Los sólidos secos se descargan finalmente del rotor a través de oberturas de descarga en la cámara colectora de la carcasa que rodea al rotor. Desde aquí y fuera de la máquina, los sólidos se eliminan por gravedad a través de una boca de salida.

Descarga del líquido abierta

La fase líquida, que forma un cilindro hueco debido a la fuerza centrífuga, fluye a través del canal helicoidal comprendido entre las aletas del transportador hacia el extremo más amplio del rotor. En este extremo el líquido sale radialmente a través de una esclusa regulable en una cámara centrada del envase de recogida y se descarga por gravedad.

Descarga presurizada del líquido

Algunas decantadoras centrífugas van equipadas de una descarga presurizada de la fase líquida que utiliza un disco centrípeto (ref. 4 en la Figura 6.2.46). El líquido que sale por las esclusas entra en una cámara centrípeta donde de nuevo forma un cilindro hueco rotatorio. Los canales del disco centrípeto estacionario se disponen inmersos en el líquido que gira, lo que provoca una presión diferencial. El líquido pasa por los canales, convirtiéndose la energía de rotación en carga de presión suficiente para bombear el líquido hacia fuera de la máquina y continuar hacia otros pasos del proceso.

Proceso contínuo

En una decantadora centrífuga los tres pasos del proceso (entrada, sedimentación en capas concéntricas y la separación de las fases sólida y líquida) se desarrollan con un flujo completamente continuo.

Componentes principales

Los componentes principales de una decantadora centrífuga son el tambor giratorio, el transportador y la caja de transmisión (que juntos constituyen el rotor) y el bastidor, que comprende la carcasa, los envases colectores, el motor de accionamiento y la transmisión por correas.

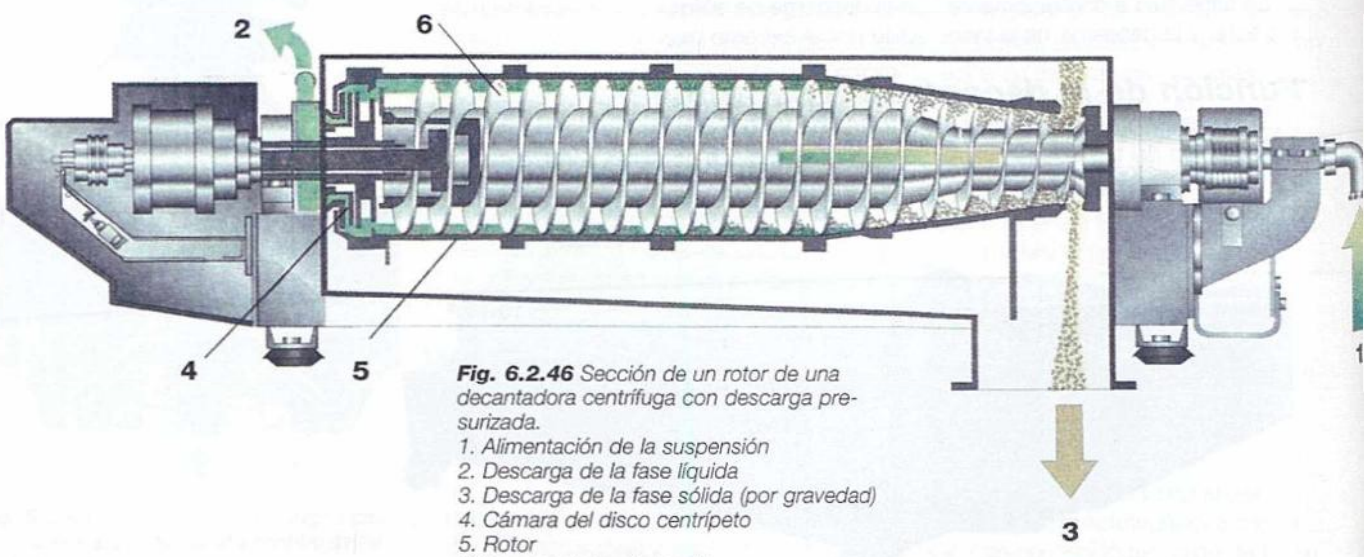


Fig. 6.2.46 *Sección de un rotor de una decantadora centrífuga con descarga presurizada.*
1. Alimentación de la suspensión
2. Descarga de la fase líquida
3. Descarga de la fase sólida (por gravedad)
4. Cámara del disco centrípeto
5. Rotor
6. Transportador de tornillo

Rotor

El rotor normalmente consta de una sección cónica y una o más secciones cilíndricas embridadas juntas. La parte cilíndrica alberga la zona de recogida de líquido y la parte cónica la zona seca.

Las secciones de la carcasa están normalmente aleteadas o acanaladas en la cara interior para prevenir que los sólidos se deslicen conforme gira el transportador.

La sección cónica termina en una matriz cilíndrica con una o dos filas de oberturas de descarga de sólidos dependiendo del tipo de máquina. Estas oberturas están en muchos casos recubiertas con forros recambiables de material cerámico para prevenir la abrasión.

El extremo más ancho está cerrado con una pieza final que tiene cuatro o más oberturas de salida de líquido que determinan el nivel radial de líquido en el rotor. El nivel de líquido se puede variar fácilmente ajustando los anillos de esclusa. En los casos en los que se realiza la descarga de la fase líquida clarificada por medio de un disco centrípeto (4), las esclusas ajustables guían a la cámara centrípeta.

El rotor es accionado por medio de un motor eléctrico con una transmisión con correas y poleas.

Transportador

El transportador está suspendido en el rotor sobre rodamientos y gira más lentamente que el mencionado rotor. Lleva al sedimento hacia las puertas de salida de lodos del extremo más estrecho. La configuración de las aletas del transportador de tornillo varía de acuerdo con la aplicación: el paso (espacio entre aletas) puede ser grueso o fino, y las aletas pueden ser perpendiculares al eje de rotación o perpendiculares a la parte cónica de la carcasa del rotor. La mayoría de los modelos están equipados con transportadores de aletas simples, pero algunos tienen las aletas dobles.

Caja de transmisión

La función de la caja de transmisión es generar el efecto de corrimiento, que provoca la diferencia de velocidades entre el tambor rotor y el transportador. Está ajustado al eje hueco del rotor y conduce al transportador por medio de un eje coaxial.

Una extensión del eje, el eje central de la caja de transmisión, se proyecta desde el extremo opuesto al rotor. Este eje puede ser movido por un motor auxiliar, haciendo posible que la velocidad del transportador pueda variarse con respecto a la velocidad del rotor.

La caja de transmisión puede ser del tipo planatario o cíclico. El primer tipo produce una velocidad helicoidal negativa (el transportador gira a una velocidad menor que el rotor), mientras que el segundo tipo, que va equipado con un eje excéntrico, da lugar a una velocidad helicoidal positiva.

Bastidor y carcasa

Existen distintos diseños de bastidor y carcasa, pero normalmente el bastidor es una estructura de acero dulce rígida que contiene las partes del rotor y se apoya sobre aislantes de vibraciones.

La carcasa es una estructura de acero inoxidable soldada con una chapa atornillada que encierra al rotor. Se divide en compartimentos para la recogida y descarga de las fases separadas sólida y líquida.

El líquido puede ser descargado por gravedad o bajo presión por medio de un disco centrípeto (ref. 4 de la Figura 6.2.46). Los sólidos se descargan por gravedad, ayudados por un vibrador si es necesario, en un envase de recogida o sobre una cinta transportadora, etc., para su evacuación.

Homogeneizadores

Tecnología de la disrupción de los glóbulos de grasa

La homogeneización es ya un proceso industrial estándar, utilizado generalmente como medio de estabilización de la emulsión de grasa frente a la separación espontánea que se produce por la acción de la gravedad. Gaulin, un francés que inventó el proceso en 1899, lo describió como "fijación de la composición de los líquidos".

La homogeneización en primer lugar provoca la disrupción o rotura de los glóbulos de grasa en otros mucho más pequeños (ver la Figura 6.3.1). Como consecuencia de este proceso, disminuye la tendencia a la separación de la nata y puede también disminuir la tendencia de los glóbulos a agruparse o a producir coalescencia. Básicamente toda la leche homogeneizada se produce por medios mecánicos. La leche es forzada a través de un pequeño paso a alta velocidad.

La desintegración de los glóbulos grasos originales se consigue por efecto de varios factores tales como turbulencia y cavitación. Lo que se consigue es reducir los glóbulos de grasa hasta aproximadamente un diámetro de 1 μm, lo que se acompaña de un incremento de cuatro a seis veces en la superfice interfacial grasa/plasma. Los glóbulos de grasa nuevos que se forman no están completamente cubiertos con material de la membrana original. De este modo, se recubren con una mezcla de proteinas absorbidas de la fase plasma.

Fox et al.[1] estudiaron el complejo proteina/grasa que se forma como consecuencia de la homogeneización de la leche. Estos autores demostraron que la caseina constituía la mitad de la proteina del complejo y que se asociaba probablemente con la fracción grasa por medio de enlaces polares. Postularon también que la micela de caseina se activaba en el momento en que pasaba a través de la válvula del homogeneizador, predisponiéndose así a interactuar con la fase lipídica.

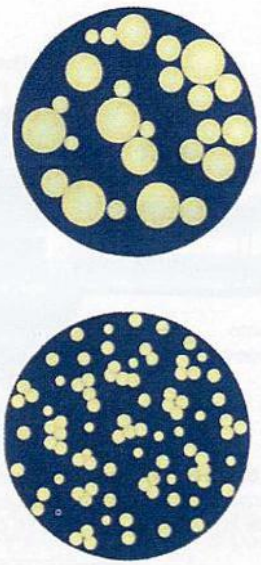


Fig. 6.3.1 *La homogenización provoca la ruptura de los glóbulos de grasa en otros mucho más pequeños.*

Necesidades de proceso

El estado físico y la concentración de la fase grasa en el momento de la homogeneización influye en la práctica sobre el tamaño y la dispersión de los glóbulos de grasa obtenidos. La homogeneización de la leche fría, en la que la grasa se encuentra prácticamente solidificada, es virtualmente inefectiva. El procesado a temperaturas que implican una solidificación parcial de la grasa de la leche (por ejemplo, 30-35ºC) da lugar a una dispersión incompleta de la fase grasa. La homogeneización es más eficiente cuando la fase grasa se encuentra en estado líquido y en concentraciones normales de la leche. Los productos con elevado contenido graso tienen más tendencia a que se produzca una separación de la grasa, sobre todo cuando la concentración de las seroproteinas es baja con respecto al contenido de grasa. La nata con un contenido de grasa superior al 12% no podrá ser normalmente homogeneizada al nivel de presión habitual, ya que se forman grumos de grasa como consecuencia de la falta de material de membrana (caseina). Para conseguir un efecto de homogeneización suficientemente bueno se requieren aproximadamente 0.2 g de caseina/g de grasa.

Los procedimientos de homogeneización a alta presión dan lugar a la formación de pequeños glóbulos de grasa. La dispersión de la fase lipídica se incrementa con el aumento de la temperatura de homogeneización y aumenta también con

1) Fox, K.K. Holsinger, Virginia, Caha, Jeanne and Pallasch, M.J., J. Dairy Sci, 43,1396 (1960).

la disminución de la viscosidad de la leche que se produce a elevadas temperaturas.

Las temperaturas de homogeneización que normalmente se aplican son de 55-80ºC y las presiones de homogeneización están entre 10 y 25 Mpa (100 - 250 bar), dependiendo del producto.

Características de flujo

Cuando el líquido pasa a través de un orificio estrecho la velocidad de flujo se incrementa (Figura 6.3.2). La velocidad se incrementará hasta que la presión estática sea tan baja que el líquido comience la ebullición. La máxima velocidad depende principalmente de la presión de entrada. Cuando el líquido sale del orificio la velocidad decrece y la presión se incrementa de nuevo. El líquido detiene su ebullición y las burbujas de vapor formadas se eliminan.

Teorías de la homogeneización

En los últimos años se han presentado muchas teorías sobre el mecanismo de la homogeneización a alta presión. En el caso de las dispersiones aceite-en-agua como la leche, donde la mayoría de las gotitas tienen menos de 1 μm (10^{-6} m) de diámetro, sólo dos teorías han sido reconocidas. Juntas dan una buena explicación de la influencia de diferentes parámetros sobre el efecto de la homogeneización. La teoría de la disrupción de glóbulos mediante *remolinos turbulentos* ("microtorbellinos") se basa en el hecho de que se forman muchos pequeños remolinos en un líquido que circula a gran velocidad. Cuanto más elevada es la velocidad más pequeños son los remolinos. Si un remolino roza una gotita de aceite de su mismo tamaño, la gota se romperá. Esta teoría predice cómo varía el efecto de homogeneización con la presión de homogeneización. Esta relación ha sido demostrada en muchos trabajos de investigación.

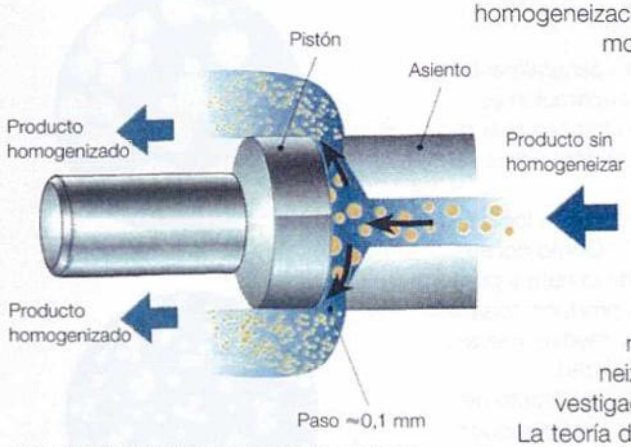


Fig. 6.3.2 *En la homogeneización la leche es forzada a través de un paso estrecho donde los glóbulos de grasa se dividen.*

La teoría de la cavitación, por otro lado, establece que las ondas de choque que se producen cuando las burbujas de vapor implosionan rompen las gotitas de grasa. De acuerdo con esta teoría, la homogeneización tiene lugar cuando el líquido sale del orificio, por lo que la recuperación de la presión que influye de forma importante en la cavitación será también importante para la homogeneización. Esto también se ha demostrado en la práctica. Sin embargo, es posible homogeneizar sin cavitación, pero es menos eficiente.

Homogeneización en simple y en doble etapa

El homogeneizador puede estar equipado con uno o dos dispositivos de homogeneización conectados en serie. De aquí la denominación de homogeneización en simple y doble etapa. Los dos sistemas se ilustran en la Figura 6.3.5 y 6.3.6.

En la homogeneización de simple etapa la caida de presión total se provoca en un dispositivo. En la homogeneización en doble etapa se mide la presión total en la primera etapa, P_1 y antes de la segunda etapa P_2. El método de dos etapas normalmente se prefiere cuando se quiere conseguir una óptima eficiencia de homogeneización. Los mejores resultados se obtienen cuando la relación P_2/P_1 es del orden de 0.2.

La homogeneización en simple etapa se puede utilizar en la homogeneización de:

-productos con bajo contenido graso,

-productos que requieren una elevada viscosidad (una cierta formación de grumos).

La homogeneización en dos etapas se usa sobre todo para romper los grumos de grasa en:

-productos con elevado contenido de grasa,

-productos con alto contenido de materia seca,

-productos donde se desea una viscosidad relativamente baja.

-óptima homogeneización (micronización).

La formación y rotura de grumos en la segunda etapa se ilustra en la Figura 6.3.3.

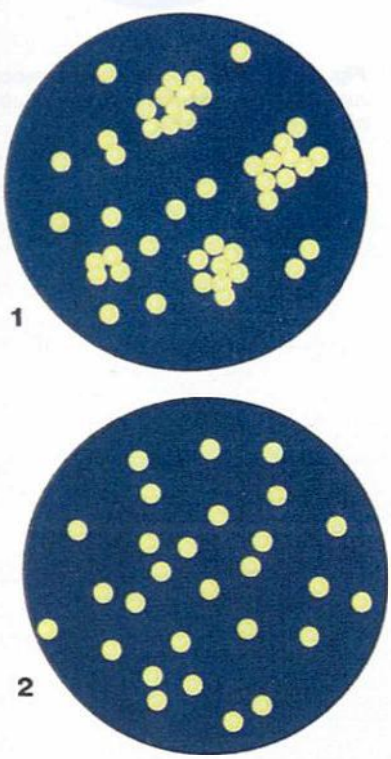


Fig. 6.3.3 *Ruptura de glóbulos de grasa en la primera y segunda etapa de homogenización.*
1. Tras la primera etapa
2. Tras la segunda etapa

Efecto de la homogeneización

El efecto de la homogeneización sobre la estructura física de la leche presenta muchas ventajas:

- Glóbulos de grasa más pequeños, sin formación de nata en la superficie.
- Color más blanco y atractivo.
- Reducción de la sensibilidad a los procesos de oxidación de la grasa.
- Sabor con más cuerpo.
- Mejor estabilidad de los productos lácteos fermentados.

Sin embargo, existen también ciertas desventajas asociadas al proceso de homogeneización:

- La leche homogeneizada no puede ser desnatada de forma eficiente.
- Aumenta la sensibilidad a la luz -del sol y fluorescente- por lo que puede aparecer un sabor metálico (Ver también el capítulo 8, Productos lácteos pasteurizados).
- Baja estabilidad térmica, especialmente en el caso de la homogeneización en simple etapa, con contenidos altos de grasa y otros factores que contribuyen a la separación de la nata.
- La leche no será adecuada para la producción de quesos duros y semiduros debido a que la cuajada será demasiado blanda y difícil de escurrir.

El homogeneizador

Los homogeneizadores de alta presión se necesitan generalmente cuando se precisa una homogeneización de alta eficiencia.

El producto entra al bloque de bombeo y es presurizado por medio del pistón de la bomba. La presión que se consigue viene determinada por la contrapresión dada por la distancia entre el émbolo y el asiento en el dispositivo de homogeneización. La presión P_1 siempre se designa presión de homogeneización. La presión P_2 es la contrapresión de la primera etapa o la presión de entrada de la segunda etapa.

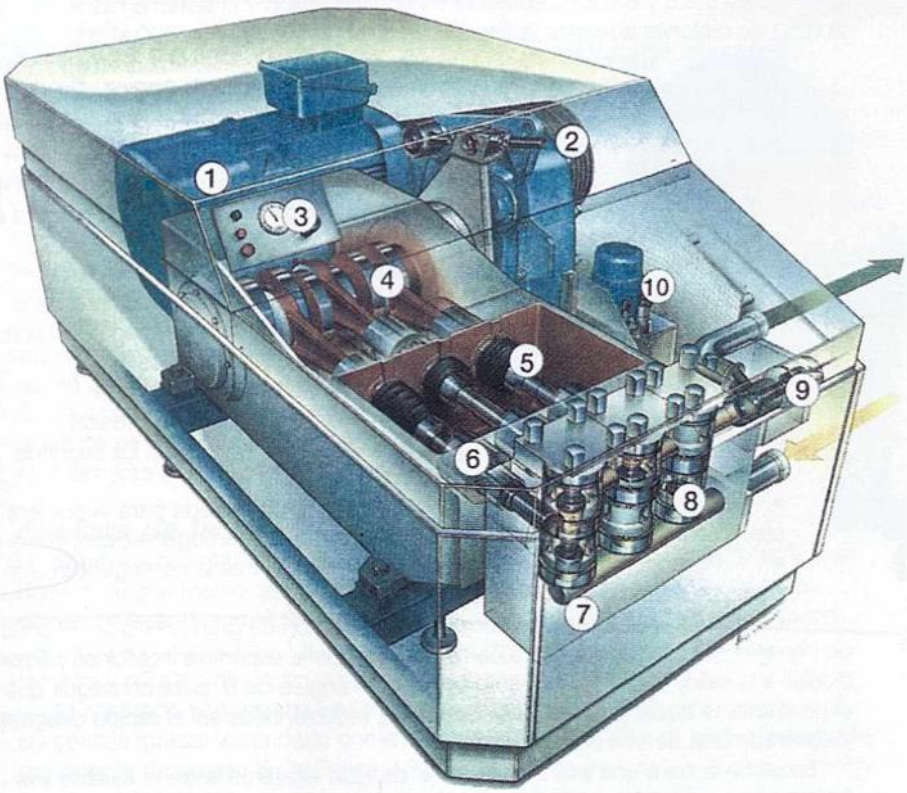


Fig. 6.3.4 *El homogenizador es una bomba de muy alta presión con un dispositivo de contrapresión.*

1. *Motor de accionamiento*
2. *Transmisión de correas*
3. *Indicación de presión*
4. *Cigüeñal*
5. *Pistón*
6. *Cartucho de sellado del pistón*
7. *Cuerpo de bombeo de acero inoxidable endurecido*
8. *Válvulas*
9. *Dispositivo de homogenización*
10. *Sistema hidraúlico de ajuste de la presión*

La bomba de alta presión

La bomba de pistón es accionada por un motor eléctrico de gran potencia (ref. 1 de la Figura 6.3.4) a través de una transmisión de cigüeñal y biela que convierte el

movimiento de rotación del motor en el movimiento alternativo de los pistones de la bomba.

Los pistones (ref. 5) se mueven en el interior de los cilindros en un bloque de alta presión. Se construyen con materiales muy resistentes. La máquina está provista de dobles segmentos por pistón. Se aplica agua al espacio entre los segmentos para enfriar los pistones. También se pueden aplicar condensados calientes para prevenir la reinfección cuando se coloca el homogeneizador después del tratamiento aséptico.

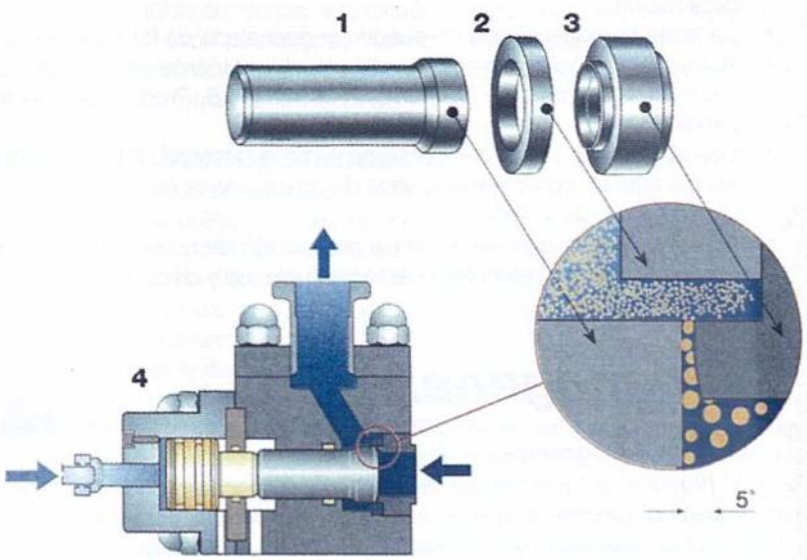


Fig. 6.3.5 *Componentes de un dispositivo de homogeneización de simple etapa.*
1. Pistón
2. Anillo de impacto
3. Asiento
4. Actuador hidráulico

El cabezal de homogeneización

Las Figuras 6.3.5 y 6.3.6 muestran la homogeneización y el sistema hidráulico. La bomba de pistones aumenta la presión de la leche desde unos 300 kPa (3 bar) a la entrada, hasta una presión de homogeneización situada entre 10 y 20 MPa (100-250 bar), dependiendo del tipo de producto. La presión de entrada a la primera etapa antes del cabezal (la presión de homogeneización) se mantiene constante automáticamente. La presión de aceite sobre el pistón hidráulico y la presión de homogeneización sobre el émbolo están equilibradas. El homogeneizador está equipado con un tanque de aceite común, sea de una o dos etapas. Sin embargo, en la homogeneización en dos etapas se tienen dos sistemas de lubricación, cada uno con su propia bomba. Se establece una nueva presión de homogeneización cambiando la presión de aceite. La presión de homogeneización se puede leer sobre el manómetro de alta presión.

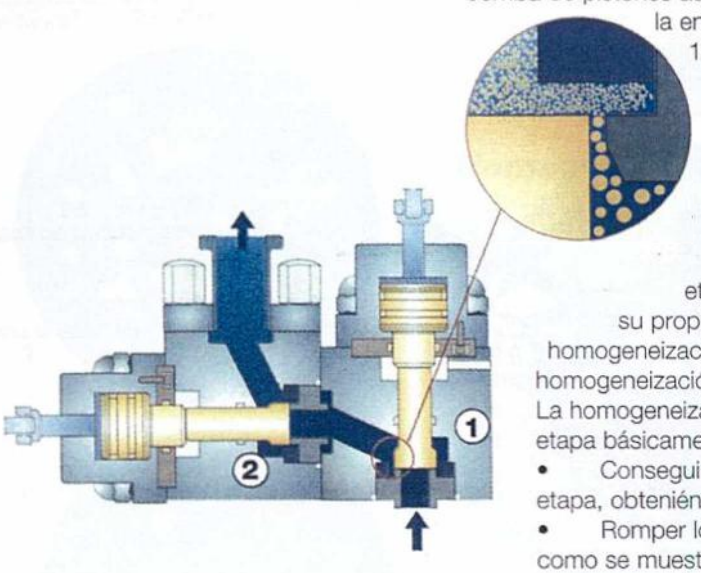


Fig. 6.3.6 *Cabezal de homogeneización de dos etapas.*
1. Primera etapa
2. Segunda etapa

La homogeneización siempre tiene lugar en la primera etapa. La segunda etapa básicamente sirve para dos propósitos:

- Conseguir una contrapresión constante y controlada para la primera etapa, obteniéndose unas mejores condiciones de homogeneización;
- Romper los grumos formados directamente tras la homogeneización como se muestra en la Figura 6.3.3.

Las partes del cabezal de homogeneización son de gran precisión. El anillo de impacto está unido al asiento de tal manera que la superficie interior es perpendicular a la salida del orificio. El asiento tiene un ángulo de 5° para conseguir que el producto se acelere de manera controlada, reduciéndose así el rápido desgaste y agrietado que de otra manera ocurriría.

La leche entra a una alta presión en el espacio existente entre el asiento y el émbolo. La amplitud del orificio es aproximadamente de 0.1 mm o 100 veces el tamaño de los glóbulos de grasa de la leche homogeneizada. La velocidad del líquido es normalmente de 100-400 m/s en el orificio anular estrecho, y la homogeneización tiene lugar en 10 - 15 microsegundos. Durante este tiempo toda la energía de presión liberada por la bomba de pistón se convierte en energía cinética. Parte de esta energía se desprende en forma de calor; cada 40 bar de caida de

La presión de homogeneización es la presión antes de la primera etapa. No la caida de presión.

presión sobre el cabezal provoca un aumento de temperatura de 1ºC. Menos de un 1% de la energía es utilizada por la homogeneización, aunque hay que decir que la homogeneización a alta presión es el método disponible más eficiente.

Eficiencia de la homogeneización

El objetivo de la homogeneización varía con la aplicación. Por lo tanto, el método de medida de la eficiencia también varía.

De acuerdo con la Ley de Stokes la velocidad de ascenso de una partícula viene dado por:

v = velocidad
g = fuerza de la gravedad
p = tamaño de partícula
η_{hc} = densidad del líquido
η_{p} = densidad de la partícula
t = viscosidad
en la fórmula:

$$V_g = \frac{p^2 \times (\eta_{hc} - \eta_{lp})}{18 \times t} \times g$$

ó $v = \text{constante} \times p^2$

Por lo anterior se puede ver que reduciendo el tamaño de partícula se reduce de manera eficiente la velocidad de ascenso. De aquí que reduciendo el tamaño de los glóbulos de grasa de la leche se reduce la velocidad de formación de la capa de nata.

Métodos analíticos

Los métodos analíticos para determinar la eficiencia de la homogeneización se pueden dividir en dos grupos:

Estudios de velocidad de formación de capa de nata

La vieja manera de determinar la velocidad de formación de la capa de nata consiste en tomar una muestra, almacenarla durante un tiempo determinado, y analizar el contenido de grasa de diferentes capas de la muestra. El método USPH se basa en esto. Una muestra de 1000 ml se almacena durante 48 horas, y a continuación se determina el contenido de grasa de 100 ml de la parte superior, y se determina también el contenido de grasa del resto. Se dice que la homogeneización es suficiente cuando el contenido de grasa de la parte superior multiplicada por 0.90 es inferior al contenido de grasa de la parte inferior.

El método NIZO se basa en el mismo principio, pero con este método una muestra de 25 ml se centrifuga durante 30 minutos a 1000 rpm, 40ºC y con un radio de 250 mm. El contenido de grasa de 20 ml del fondo se divide por el contenido de grasa de la muestra entera, y el resultado es multiplicado por 100. El valor obtenido se denomina Indice NIZO. El Indice NIZO de la leche pasteurizada es normalmente del 50-80%.

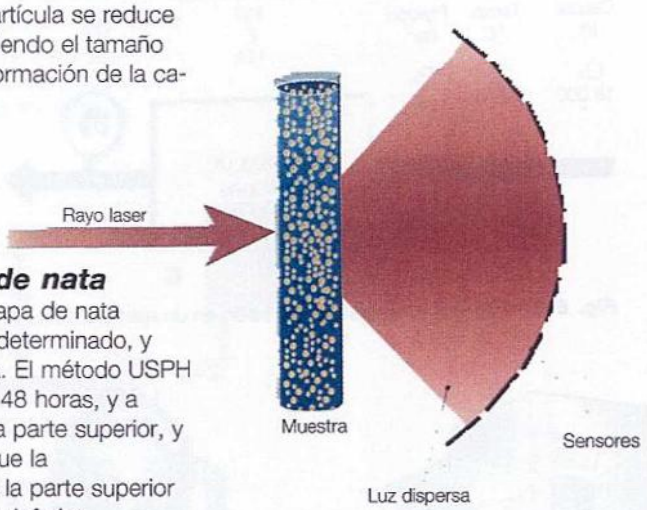


Fig. 6.3.7 *Análisis de partículas por difracción laser.*

Análisis de la distribución de tamaños

La distribución de tamaños de las partículas o gotitas de una muestra se puede determinar por medio de un método bien definido, utilizando una unidad de difracción laser (Figura 6.3.7), que envía un rayo laser a través de una muestra colocada en una cubeta. La luz se dispersa más o menos dependiendo del tamaño y número de partículas presentes en la muestra.

El resultado se presenta en forma de curvas de distribución de tamaños. El porcentaje (grasa) viene dado como una función del tamaño de partícula (tamaño del glóbulo de grasa). En la Figura 6.3.8 se muestran tres curvas típicas de distribución de tamaños para leche. Es interesante resaltar que la curva se desplaza hacia la izquierda conforme se aumenta la presión de homogeneización.

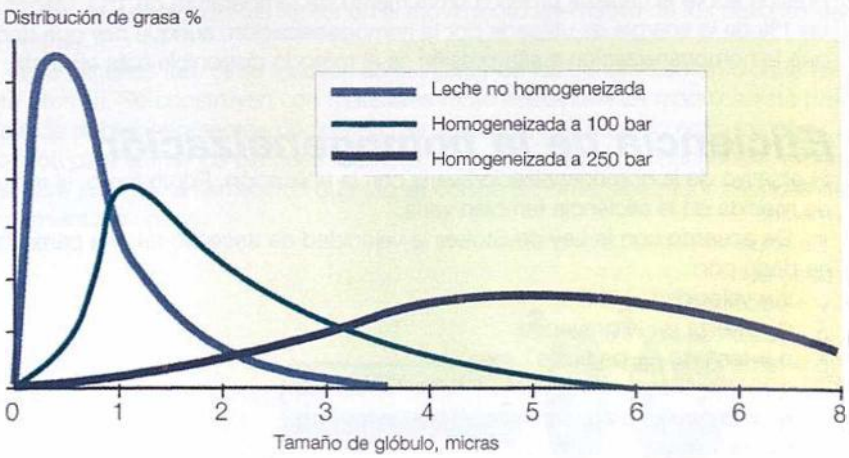


Fig. 6.3.8 *Curvas de distribución de tamaños.*

Consumo de energía e influencia de la temperatura

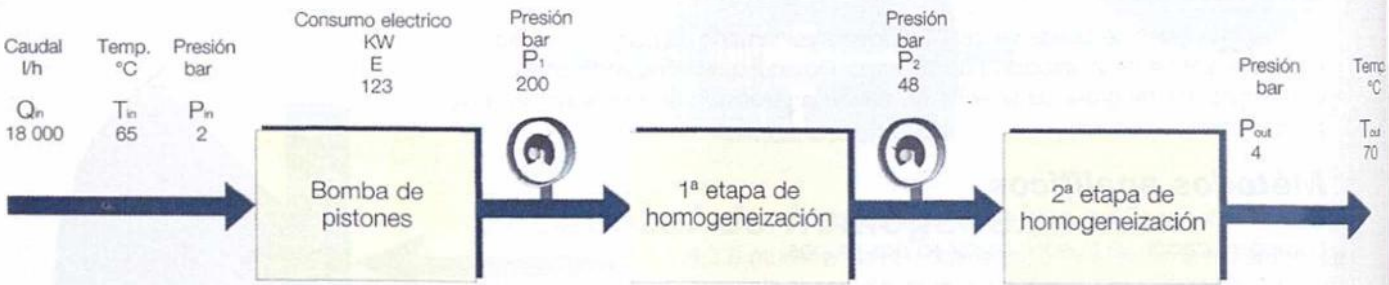


Fig. 6.3.9 *Energía, temperatura y presión en un ejemplo de homogeneización.*

La potencia eléctrica efectiva que se necesita en la homogeneización viene determinada por la fórmula:

	Ejemplo
E = Potencia eléctrica efectiva, kW	
Q_{in} = Capacidad de trabajo, l/h	18000 l/h
P_1 = Presión de homogeneización, bar	20 Mpa (200 bar)
P_2 = Presión de llegada a la bomba, bar	200 kPa (2 bar)
η_{bomba} = coeficiente de rendimiento de la bomba	0.85
η_{motor} = coeficiente de rendimiento del motor eléctrico	0.95

$$E = \frac{Q_{in} \times (P_1 - P_2)}{36\,000 \times \eta_{bomba} \times \eta_{motor}} + T_{in}$$

Con las cifras dadas más arriba a modo de ejemplo para la capacidad de trabajo y las presiones, la demanda de potencia eléctrica será de 123 kW.

Tal como se ha indicado anteriormente, parte de la energía de presión suministrada se disipará como calor. Dada la temperatura del alimento, T_{in}, la presión de homogeneización, P_1, la presión tras la homogeneización, Psal, y si se considera que cada 4 Mpa (40 bar) de caida de presión aumenta la temperatura 1ºC, se puede aplicar la siguiente fórmula para el cálculo de la temperatura de salida:

$$T_{out} = \frac{P_1 - P_{out}}{40} + T_{in}$$

El consumo energético, el aumento de temperatura y la disminución de presión se ilustran en la Figura 6.3.9.

T_{in} = 65ºC
P_1 = 20 Mpa (200 bar)
P_{out} = 400 kPa (4 bar)
da como resultado
T_{out} = 70ºC

El homogeneizador en una línea de proceso

En general, el homogeneizador se coloca antes de la sección de calentamiento final en un intercambiador de calor. Normalmente, en la mayoría de las plantas de pasteurización en la producción de leche comercial, el homogeneizador se coloca tras la primera sección de regeneración.

En la producción de leche UHT el homogeneizador se instala generalmente antes de los sistemas indirectos de tratamiento, pero siempre después de los sistemas directos de tratamiento, por ejemplo, en el lado aséptico tras el tratamiento UHT. El homogeneizador entonces tendrá un diseño aséptico con sellos especiales para los pistones, empaquetaduras, condensador de condensados esteriles y reguladores asépticos especiales.

Sin embargo, la instalación de los homogeneizadores se recomienda que sea después de los sistemas UHT indirectos cuando se van a procesar productos lácteos con un contenido de grasa superior a 6-10% y/o con un contenido de proteinas incrementado. La razón es que al tener unos contenidos de grasa y proteinas mayores, los grumos de grasa y/o aglomerados de proteinas se forman a muy altas temperaturas de tratamiento térmico. Estos grumos/aglomerados se rompen en el homogeneizador aséptico situado después de este tratamiento térmico.

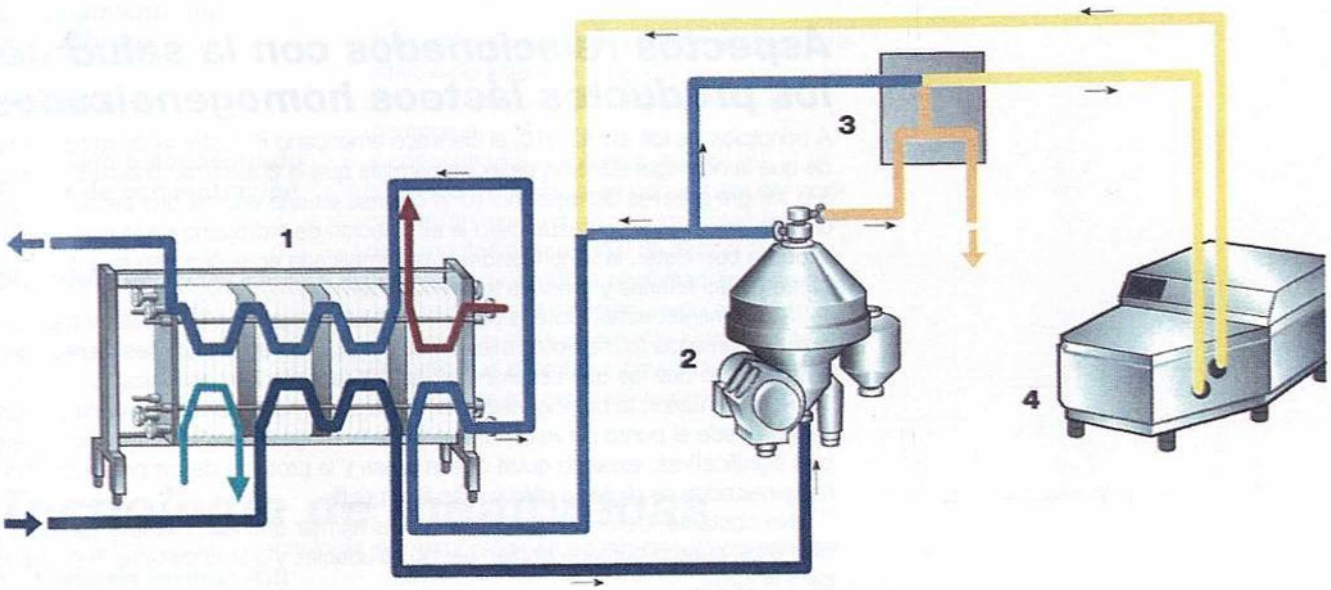


Fig. 6.3.10 *Flujo de producto en una homogeneización parcial.*
1. Intercambiador de calor
2. Separadora centrífuga
3. Dispositivo automático de normalización de grasa
4. Homogeneizador

Homogeneización total

La homogeneización total o de toda la corriente entrante es la que normalmente se realiza en la leche comercial y la leche destinada a productos lácteos fermentados. El contenido de grasa de la leche se normaliza antes de la homogeneización, y algunas veces (por ejemplo, en la producción de yogur) el contenido de sólidos no grasos también.

Las fórmulas para los cálculos son:

1. $$Q_{sm} = \frac{Q_p \times (f_{cs} - f_m)}{f_{cs} - f_{sm}}$$

2. $$Q_h = \frac{Q_{sm} \times f_{sm}}{F_{ch}}$$

Homogeneización parcial

La homogeneización de parte del caudal (homogeneización parcial) implica que la leche desnatada no se homogeneiza, sino que sólo se homogeneiza la nata con una pequeña proporción de leche desnatada. Esta forma de homogeneización se aplica principalmente a la leche pasteurizada comercial. La razón principal es que este procedimiento reduce costes de operación. El consumo total de potencia se reduce al 65% porque se pasa un caudal más pequeño a través del homogeneizador.

Como se puede conseguir una homogeneización suficientemente buena cuando el producto contiene al menos 0.2 g de caseina/g de grasa, se recomienda un máximo contenido de grasa en la nata del 12%. La capacidad horaria de un homogeneizador que se utiliza para una homogeneización parcial se puede dimensionar de acuerdo con el ejemplo que se indica a continuación.

Ejemplo:

Q_p = Capacidad de la planta, l/h	
Q_{sm} = Salida de leche normalizada, l/h	
Q_h = Capacidad del homogeneizador, l/h	
f_m = contenido de grasa de la leche cruda, %	4%
f_{sm} = contenido de grasa de la leche normalizada, %	3%
f_{cs} = contenido de grasa de la nata saliente de la separadora, %	35%
f_{ch} = contenido de grasa de la nata que se va a homogeneizar, %	10%

La salida horaria de leche pasteurizada normalizada, Q_{sm}, será aproximadamente de 9690 l que, si se sustituye en la fórmula 2, da una capacidad horaria del homogeneizador de aproximadamente 2900 litros, es decir, alrededor de un tercio de la capacidad de salida.

El modelo de flujo en una planta de homogeneización parcial de leche se ilustra en la Figura 6.3.10.

Aspectos relacionados con la salud de los productos lácteos homogeneizados

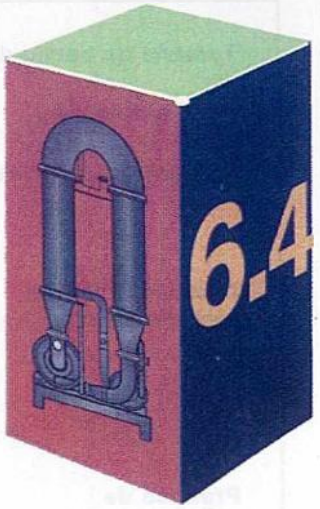
A principios de los años 1970, el científico americano K. Oster lanzó la hipótesis de que la homogeneización de leche permitía que la enzima xantinaoxidasa pasara a la sangre a través del intestino. (Una oxidasa es una enzima que cataliza la adición de oxígeno a una sustancia o la eliminación de hidrógeno de la misma). De acuerdo con Oster, la xantinaoxidasa está implicada en el proceso que deteriora la pared de las arterias y produce la arterioesclerosis.

Actualmente, esta hipótesis ha sido rechazada por los científicos en base a que las personas forman ellas mismas estas enzimas en cantidades cientos de veces mayores que las que serían ingeridas con la leche homogeneizada.

Por lo anterior, la homogeneización de la leche no tiene efectos dañinos para la salud. Desde el punto de vista nutricional, la homogeneización no provoca diferencias significativas, excepto quizá que la grasa y la proteina de los productos homogeneizados se digieren más y más fácilmente.

No obstante, Oster estaba en lo cierto al afirmar que los procesos de oxidación en el cuerpo humano podían ser no saludables y que la dieta es importante para la salud.

Filtros de membrana



La tecnología de membranas es un método de separación fiable que se utiliza en niveles iónicos y moleculares. Durante los últimos años, desde comienzos de los años 1970, esta técnica se ha ido adaptando a la industria láctea.

Definiciones

A continuación se indica la definición de algunos de los términos usados frecuentemente:

Alimento = la solución a ser concentrada o fraccionada.

Flujo = la velocidad de extracción de permeato medido en litros por metro cuadrado de superficie de membrana y por hora (l/m².h).

Ensuciamiento de la membrana = deposición de sólidos sobre la membrana, irreversible durante el procesado.

Permeato = el filtrado, el líquido que pasa a través de la membrana.

Retentato o concentrado = el concentrado, el líquido retenido.

Factor de concentración = la reducción de volumen conseguida por concentración, es decir, la relación volumen inicial de alimento/volumen final de concentrado.

Diafiltración = una modificación de la ultrafiltración en la que se añade agua al alimento como producto de filtración con el fin de eliminar componentes del alimento que pasarían a través de la membrana, básicamente lactosa y minerales.

Tecnología de membranas

En la industria láctea, la tecnología de membranas se asocia principalmente con

- **Osmosis inversa (OI)**
  -concentración de soluciones por eliminación de agua
- **Nanofiltración (NF)**
  -concentración de componentes orgánicos por eliminación de parte de iones monovalentes como el sodio y cloruros (desmineralización parcial)
- **Ultrafiltración (UF)**
  -concentración de grandes moléculas y macromoléculas
- **Microfiltración (MF)**
  -eliminación de bacterias, separación de macromoléculas

El abanico de posibilidades de aplicación de los procesos de separación por membranas en la industria láctea se muestra en la Figura 6.4.1.

Todas las técnicas citadas se caracterizan por realizar una filtración por membranas según un flujo cruzado. La solución alimento se fuerza a pasar a través de una membrana bajo presión. La solución se hace circular sobre una membrana y los sólidos (retentato) se retienen mientras que el permeato pasa a través de ella. Las membranas se clasifican por su peso molecular de corte, que se identifica con

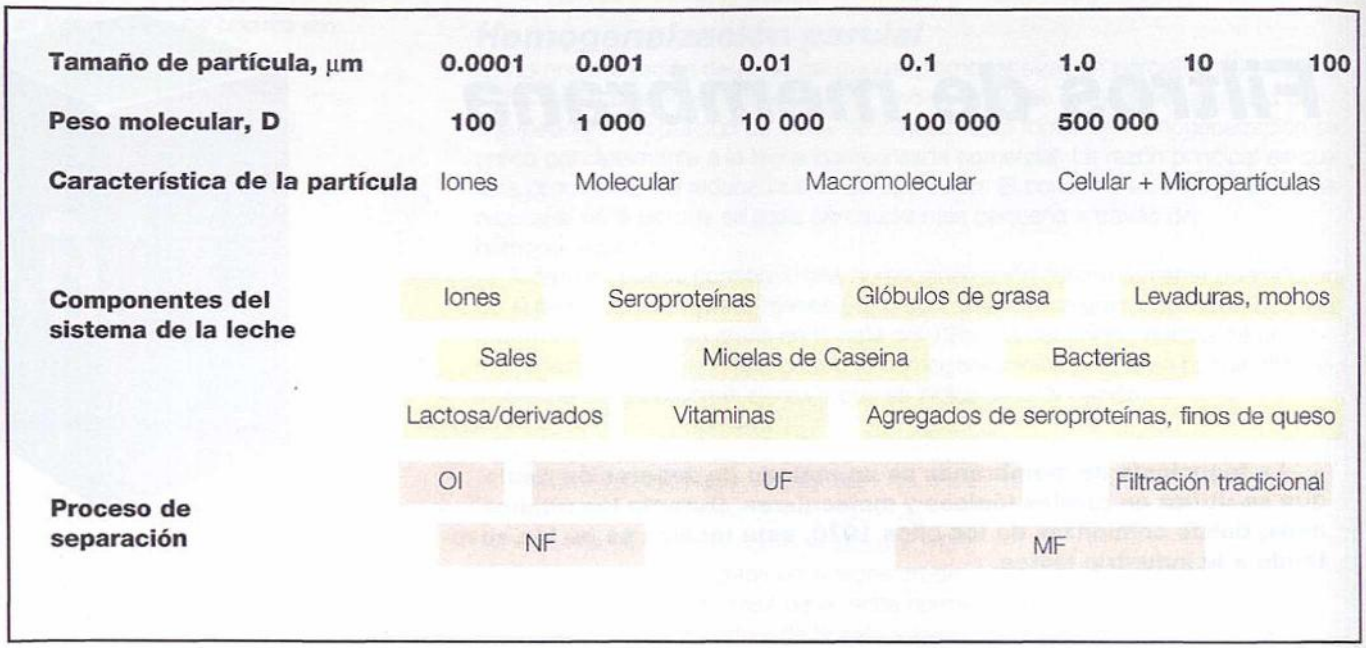


Fig. 6.4.1 *Espectro de aplicación de los procesos de separación por membranas en la industria láctea.*

el peso molecular de la molécula más pequeña que no pasa a través de la membrana. Sin embargo, debido a distintas interacciones, una membrana no puede ser seleccionada unicamente sobre la base del peso molecular de corte.

Es interesante tener en cuenta que la filtración tradicional o convencional, también llamada filtración estática, normalmente se utiliza para separación de partículas en suspensión mayores de 10 mm, mientras que la filtración por membranas separa sustancias de peso molecular menor de 10^{-4} µm.

La diferencia básica entre la filtración convencional y por mebranas es la que se ilustra en la Figura 6.4.2.

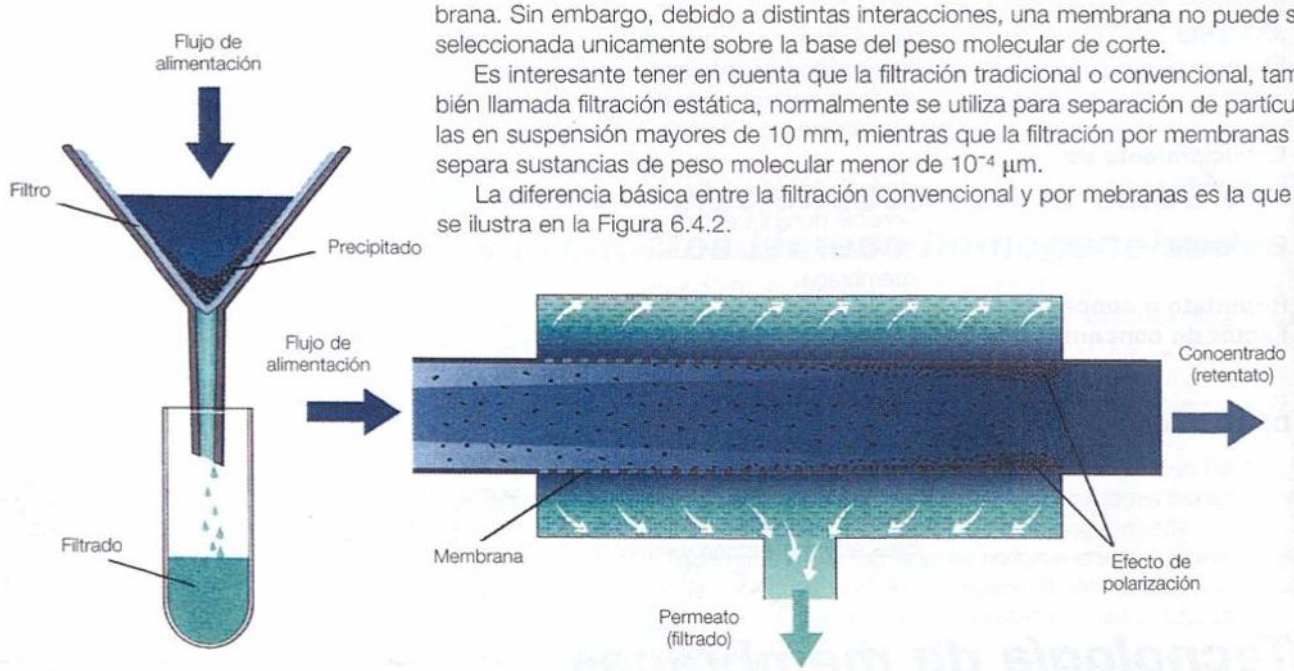


Fig. 6.4.2 *Diferencias básicas entre la filtración convencional (izquierda) y la filtración con membranas.*

Se pueden apuntar varias diferencias entre la filtración convencional y la filtración por membranas:

- En cuanto a medio de filtración utlizado. Los filtros *convencionales* son de cierto espesor con estructuras abiertas. Material: Típicamente papel. Los filtros de *membranas* son delgados y un tamaño de poro uniforme y controlado. Material: polímeros y cerámicas, actualmente en raras ocasiones acetato de celulosa.
- En filtración convencional, la gravedad es la fuerza principal que provoca la separación de las partículas. La presión sólo se aplica para acelerar el proceso. El flujo del alimento es perpendicular al medio de filtración, y la filtración se puede llevar a cabo en sistemas abiertos.
- En filtración por membranas, el uso de la presión es esencial como fuerza impulsora de la separación y se sigue un diseño de flujo cruzado o tangencial. La solución que se alimenta se hace circular paralela a la superficie de la membrana y el

permeato fluye perpendicular a la membrana de filtración. La filtración se debe llevar a cabo en un sistema cerrado.

Principios de separación por membranas

En la industria láctea las técnicas de separación por membranas se utilizan en diferenctes procesos:

- **OI** - se utiliza para la deshidratación del lactosuero, el permeato de UF y el condensado.
- **NF** - se utiliza cuando se desea la desalinización parcial del lactosuero, el permeato de UF o el retentato.
- **UF** - Normalmente se utiliza para la concentración de las proteinas en la leche y en el lactosuero y para la normalización proteica de la leche destinada a la fabricación de queso, yogur y otros productos lácteos.
- **MF** - básicamente se utiliza para la reducción del número de bacterias en la leche desnatada, lactosuero y salmueras, pero también para la reducción del contenido en grasa del lactosuero destinado a la fabricación de concentrados proteicos de lactosuero (CPL) y para el fraccionamiento de proteinas.

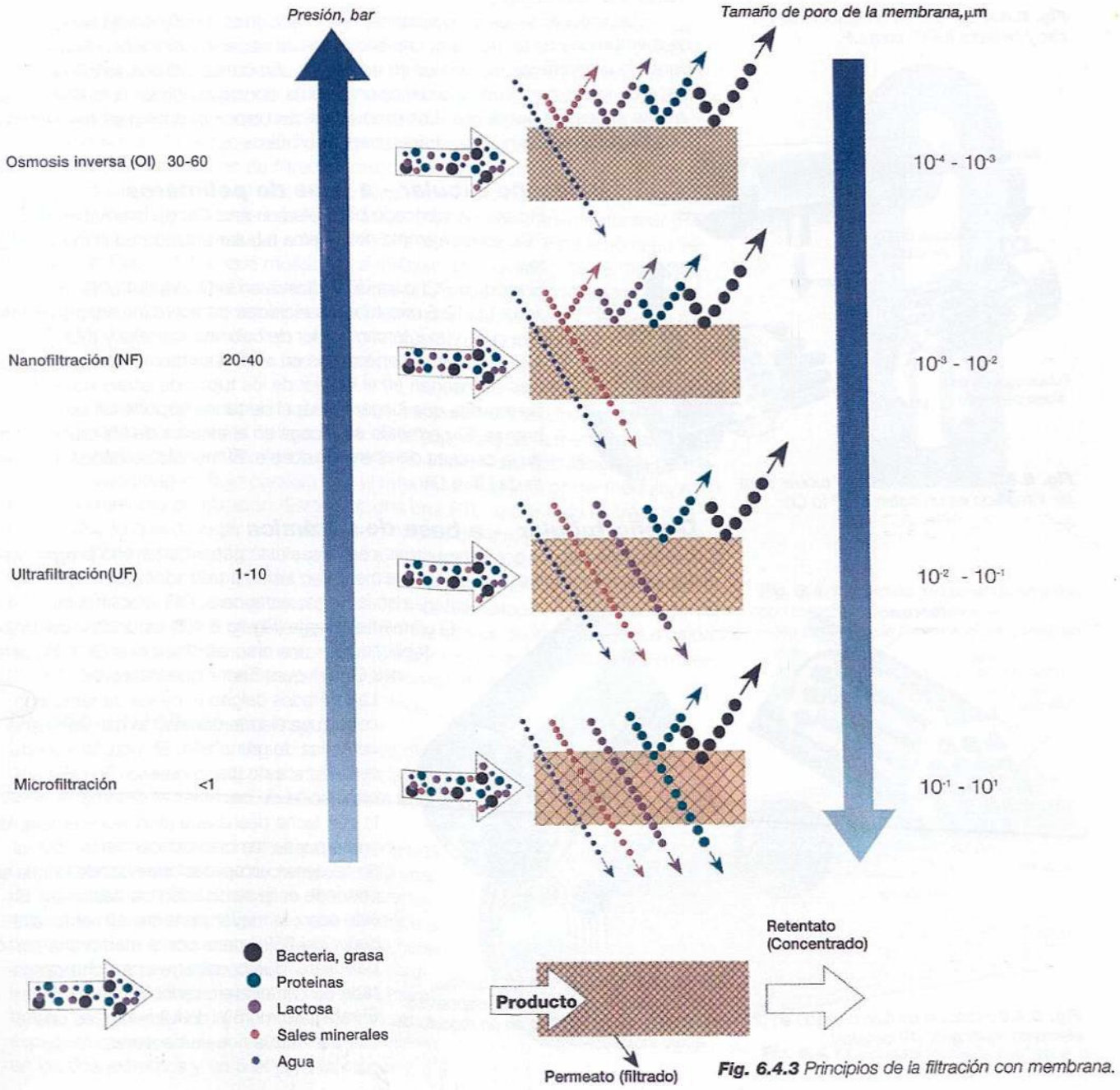


Fig. 6.4.3 *Principios de la filtración con membrana.*

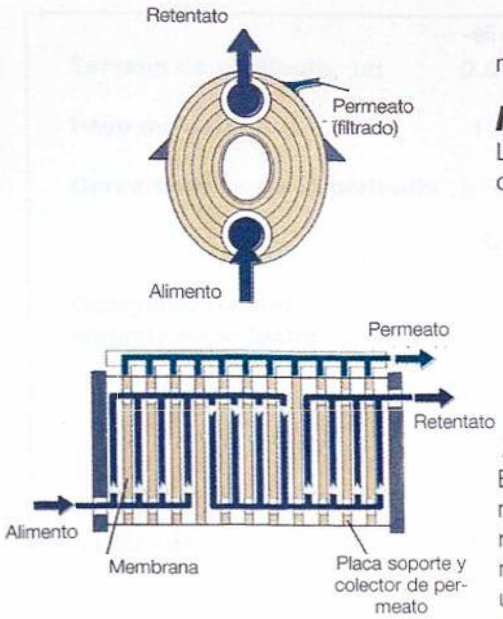


Fig. 6.4.4 *Ejemplo de un sistema de placas y bastidor (DDS) para UF.*

Los modelos generales de flujo de los distintos sistemas de separación por membranas se ilustran en la Figura 6.4.3.

Módulos de filtración

Los módulos de filtración que se utilizan habitualmente pueden tener diferentes configuraciones:

Diseño	Aplicación típica
Láminas enrolladas en espiral	OI, NF, UF
Placas y bastidor	UF, OI
Tubular, basado en polímeros	UF, OI
Tubular, basado en cerámica	MF, UF
Fibra hueca	UF

Diseño de placas y bastidor

Estos sistemas constan de membranas emparedadas entre placas soporte de las membranas que se disponen en paquetes, de manera similar a los intercambiadores de calor de placas. El producto a tratar se fuerza a pasas a través de unos canales muy estrechos que se pueden disponer para conseguir un flujo en paralelo o una combinación de canales con flujo en paralelo y en serie. En la Figura 6.4.4 se muestra un diseño típico.

Un módulo se divide normalmente en secciones donde el flujo entre pares de membranas es en paralelo. Las secciones se separan por medio de placas soporte de membranas especiales en las cuales uno de los orificios se cierra con un disco de cierre para invertir la dirección de flujo, consiguiendo un flujo en serie entre las sucesivas secciones. Los módulos están disponibles en distintos tamaños.

Material de membrana: normalmente polímeros.

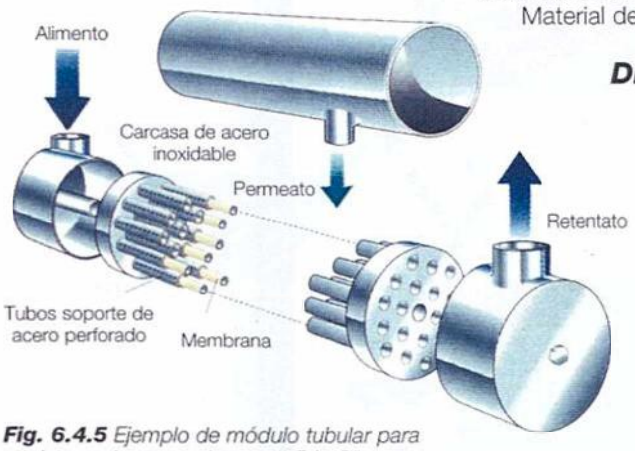


Fig. 6.4.5 *Ejemplo de módulo tubular para ser integrado en un sistema UF (o OI).*

Diseño tubular - a base de polímeros

El sistema fabricado por Paterson and Candy International Ltd, PCI, es un ejemplo de sistema tubular utilizado en la industria láctea.

El módulo PCI para UF se ilustra en la Figura 6.4.5. El módulo tiene 18x12.5 mm tubos perforados de acero inoxidable montados como un intercambiador de calor de carcasa y tubos. Los 18 tubos están conectados en serie. Las membranas recambiables se insertan en el interior de los tubos de acero inoxidable perforados que juegan el papel de tubos soporte de las membranas. El permeato se recoge en el exterior de los tubos dentro de la carcasa de acero inoxidable. El módulo se puede reconvertir de UF a OI.

Diseño tubular - a base de cerámica

El concepto tubular con membranas cerámicas está ganando terreno progresivamente en la industria láctea, especialmente en sistema utilizados para reducir las bacterias en la leche, lactosuero, CPL y salmuera.

El elemento filtrante (Figura 6.4.6) es un filtro cerámico fabricado por una empresa francesa, SCT (Societé des Céramiques Techniques/Ceraver).

Las paredes delgadas de los canales, que constituyen la membrana, se fabrican con cerámica de grano fino. El material soporte es cerámica de grano grueso. En MF para eliminación de bacterias el sistema se alimenta con leche desnatada (con leche entera, la grasa puede también concentrarse, lo cual no se desea en aplicaciones donde lo que se pretende es la eliminación de bacterias). En este caso, la mayor parte del alimento (alrededor del 95%) pasa por la membrana como permeato, que constituye una leche desnatada con un número reducido de bacterias. El retentato, un 5% del alimento, es una leche desnatada rica en bacterias.

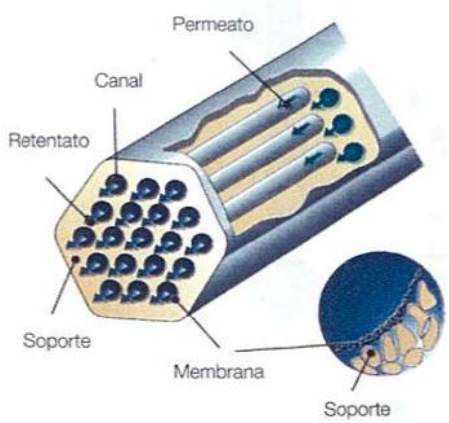


Fig. 6.4.6 *Filtración de flujo cruzado en un elemento multicanal (19 canales).*

Fig. 6.4.7 *Los elementos filtrantes, 1,7 o 19 (los que se muestran), dispuestos en paralelo, se instalan en un modulo de acero inoxidable.*

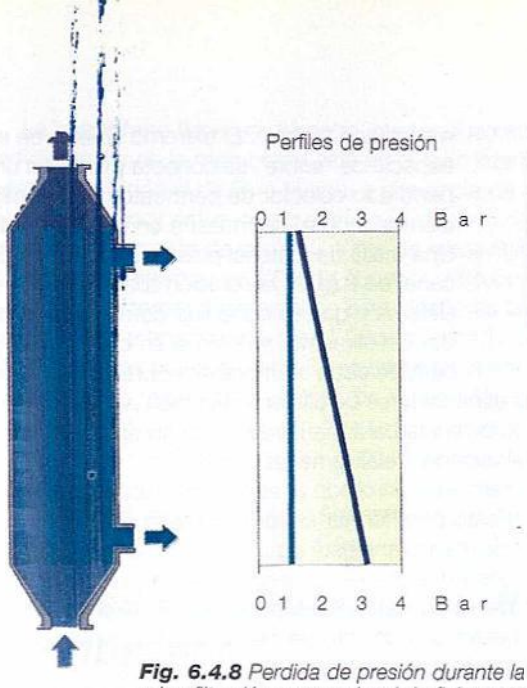


Fig. 6.4.8 *Perdida de presión durante la microfiltración convencional de flujo cruzado.*

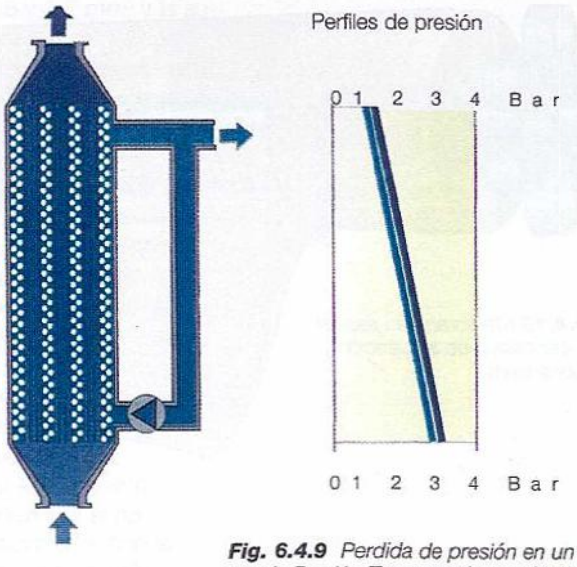


Fig. 6.4.9 *Perdida de presión en un sistema de Presión Transmembranar Uniforme.*

Los elementos filtrantes (1, 7 ó 19 en paralelo) se instalan en un módulo. La Figura 6.4.7 muestra un módulo con 19 elementos filtrantes, uno de los cuales se expone a la izquierda del módulo. En aplicaciones industriales se ponen dos módulos juntos en serie, formando un circuito cerrado de filtración con una bomba de circulación de retentato y una bomba de circulación de permeato (Figura 6.4.10).

Dependiendo de la capacidad de trabajo que se pretenda desarrollar, se pueden instalar varios circuitos de filtración dispuestos en paralelo.

El producto se bombea hacia los módulos de filtración aumentando progresivamente el caudal o velocidad de flujo másico. Una presión transmembranar (PTM) muy alta en la entrada causa la colmatación de la membrana. Este fenómeno se ilustra en la Figura 6.4.8, que muestra una instalación convencional de microfiltración de flujo cruzado. La experiencia muestra que una presión transmembranar baja da lugar a un comportamiento de la membrana mucho mejor, pero en la microfiltración convencional de flujo cruzado la presión transmembranar baja sólo ocurre a la salida, que afecta a una superficie de membrana relativamente pequeña.

Se ha introducido un sistema de Presión Transmembranar Uniforme (PTU) para conseguir unas condiciones óptimas en toda la superficie de la membrana. El sistema patentado que se ilustra en la Figura 6.4.9 implica una circulación de permeato a alta velocidad en flujo paralelo con el retentato en el interior del módulo, pero fuera del elemento de filtración. Esto ocasiona una PTU sobre toda el area de la membrana, lo que da lugar a una utilización óptima de la membrana.

Este último sistema es posible gracias al espacio entre los elementos dentro del módulo. Es decir, la parte del permeato normalmente está vacía, pero en este sistema PTU está llena con granos de plástico. La alta velocidad de circulación del permeato da lugar a una pérdida de presión en el interior de los canales. La caida de presión en la parte del permeato se regula por medio de la bomba de permeato y se mantiene constante durante la operación de la planta.

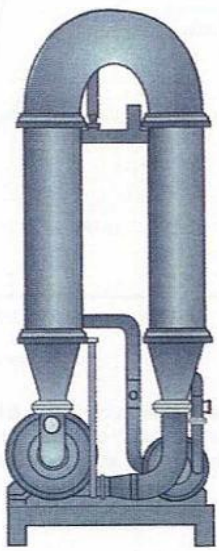


Fig. 6.4.10 *Circuito industrial de filtración con membranas, consistente en:*
- *dos módulos de filtración conectados en serie.*
- *una bomba de circulacion de retentato*
- *una bomba de circulación de permeato.*

Diseño enrrollado en espiral

Como este tipo de diseño difiere de los otros diseños de filtración por membranas usados en la industria láctea, merece la pena explicar con un poco más de detalle este sistema.

Un elemento enrollado en espiral contiene una o más membranas "sobre de correos", cada una de las cuales contiene dos capas de membrana separadas por un material poroso que conduce al permeato. Este último material, denominado canal espaciador de permeato, permite que fluya libremente el permeato que pasa a través de la membrana. Las dos capas de membrana con el canal espaciador entre ellas son selladas con adhesivo en los dos extremos y un final para formar la

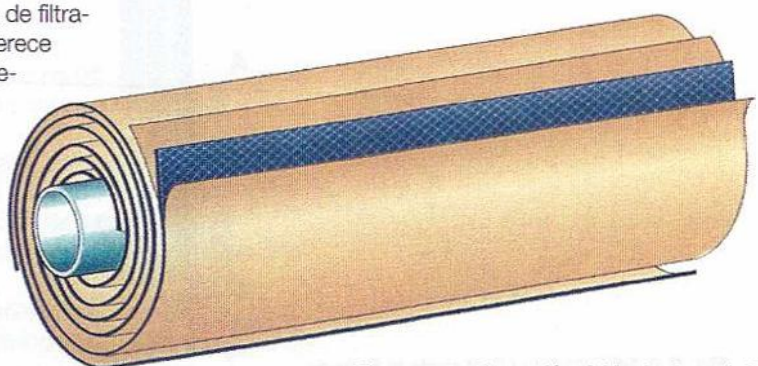


Fig. 6.4.11 *Formación del "sobre" en el diseño de filtro en espiral.*

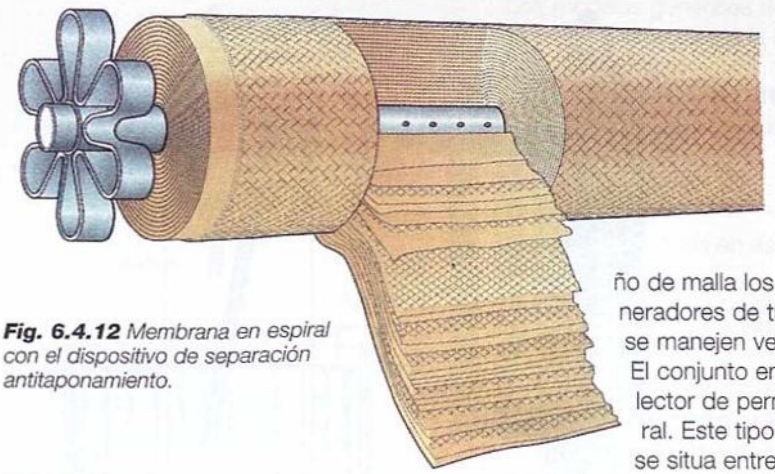


Fig. 6.4.12 *Membrana en espiral con el dispositivo de separación antitaponamiento.*

membrana "sobre". El extremo abierto de esta especie de "sobre" se conecta y sella en un tubo perforado colector de permeato. Esta configuración de "sobre" se muestra en la Figura 6.4.11. Una malla de material plástico, que actúa como canal de flujo de la solución alimento a través del sistema y que es conocido como canal espaciador del alimento, se coloca en contacto con una cara de cada membrana "sobre". Debido al diseño de malla los espaciadores de alimento también actúan como generadores de turbulencia para mantener la membrana limpia aunque se manejen velocidades relativamente bajas.

El conjunto entero está enrollado alrededor del tubo perforado colector de permeato para formar así la membrana enrollada en espiral. Este tipo de membrana está equipada con un dispositivo que se situa entre los extremos de los elementos de membrana para prevenir que la velocidad del fluido tratado provoque que las capas se taponen.

En la Figura 6.4.12 se muestra un conjunto de membranas con diseño en espiral con un dispositivo para conexión en serie de distintas unidades.

Se pueden conectar varios elementos en serie -normalmente tres- dentro del mismo tubo de acero inoxidable, tal como se muestra en la Figura 6.4.13. La membrana y el material espaciador de permeato son de polímeros.

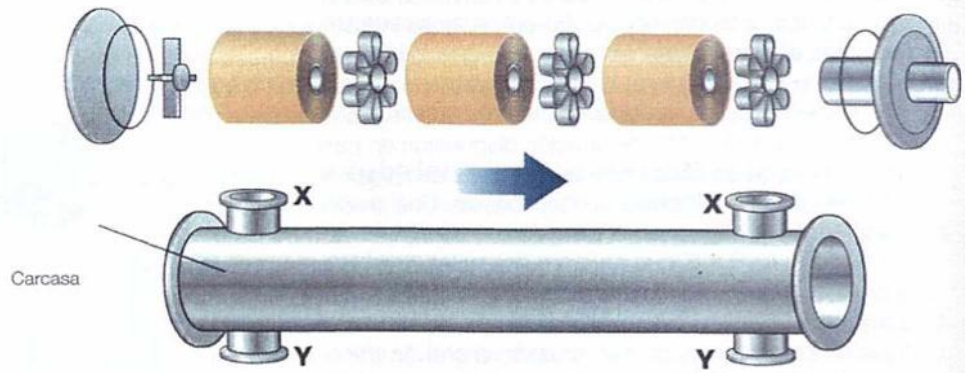


Fig. 6.4.13 *Montaje de un módulo de membranas en espiral. Las bocas de conexión (X e Y) se pueden utilizar para conseguir una disposición en apilamiento, que se utilizará sobre todo en UF.*

Diseño de fibra hueca

Los módulos de fibra hueca son cartuchos que contienen haces de 45 a más de 3000 elementos de fibra hueca por cartucho. Las fibras se orientan en paralelo. Todas están empotradas en una resina en sus extremos y encerradas en el tubo colector de permeato, que está construido de resina epoxy.

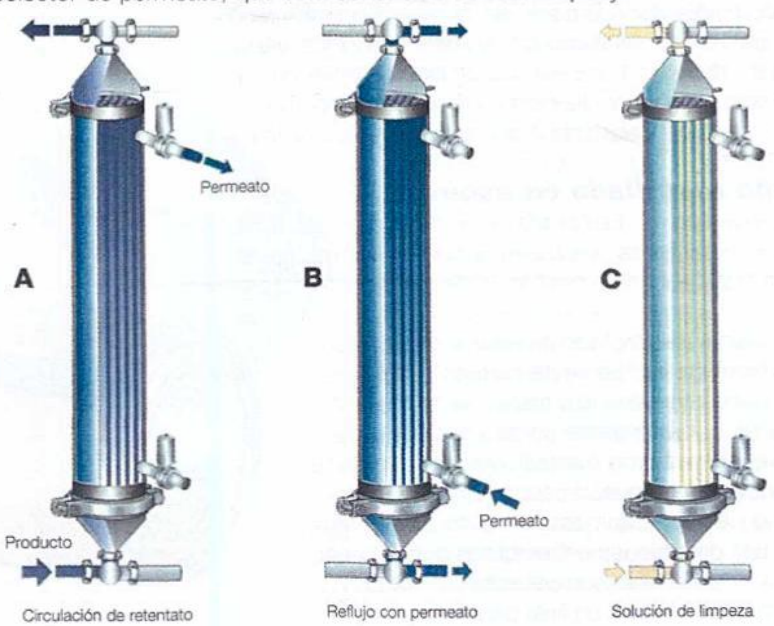


Fig. 6.4.14 *Cartucho UF durante la filtración (A), reflujo con permeato (B), y limpieza (C).*

La membrana tiene un diámetro interior que oscila entre 0.5 y 2.7 mm, y la superficie activa de la membrana está en el lado interior de la fibra hueca. La cara exterior de la pared de fibra hueca, a diferencia de la pared interior, tiene una estructura rugosa y actua como estructura soporte de la membrana. La corriente alimento fluye a través de la cara interior de estas fibras, y el permeato se recoge en el exterior y se elimina en la parte superior del tubo.

Una característica especial de este diseño es la capacidad de enjuagado con flujo de agua a través de la membrana en sentido contrario al paso normal de permeato. Esto es especialmente interesante en la limpieza, pero también se utiliza con permeato recirculado a través de la conexión de permeato más exterior para eliminar depósitos de producto que se encuentran sobre la superficie de la membrana. Varios modos de operación de un módulo de fibra hueca se ilustran en la Figura 6.4.14.

El material de la membrana está constituido por polímeros.

Límites de separación de las membranas

El límite de separación de una membrana viene determinado por el peso molecular más pequeño que puede separar. La membrana puede tener un límite de separación preciso o difuso, como se ilustra en la Figura 6.4.15 para dos membranas UF. El mismo fenómeno ocurre en otros tipos de separadores de membranas, pero la pendiente de las curvas puede ser diferente. Las membranas con un límite de separación preciso separan cualquier sustancia con un peso molecular precisamente más bajo, mientras que las membranas con un límite difuso permitirán el paso de algunas partículas de peso molecular mayor y también pueden detener a otras con peso molecular menor.

La precisión de separación de una membrana viene determinada por el tamaño de poro y por la distribución del tamaño de poro. Como no es posible llevar a cabo un fraccionamiento exacto de acuerdo con la masa molecular o el diámetro molecular, los límites son más o menos difusos.

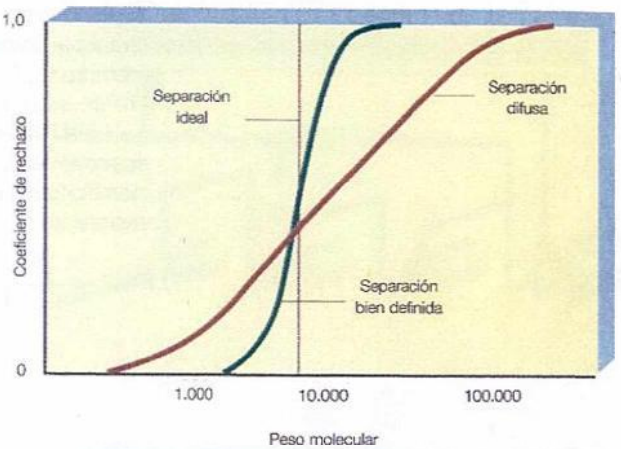


Fig. 6.4.15 *Características de rechazo típico de las membranas de ultrafiltración mostrando una filtración de pesos moleculares, ideal, bien definida y difusa.*

La afirmación de que el peso molecular determina el límite de separación debe ser considerada con ciertas reservas, ya que la forma de las partículas separadas también influye. Una partícula esférica es más fácil de separar que una partícula con forma de cadena. Además se acaba de desarrollar una "membrana secundaria" para macromoléculas, como proteinas, que puede constituir una membrana que realmente determine el límite de separación molecular.

Transporte del material a través de las membranas

La capacidad de separación depende de varios factores:

- Resistencia de la membrana, que es característica de cada membrana y viene determinada por:
  -el espesor de la membrana,
  -el area superficial,
  -el diámetro de los poros.
- Resistencia al transporte, por efecto de la polarización o del ensuciamiento. La polarización es un efecto de ensuciamiento (o cegado) que ocurre en la superficie de las membranas durante la filtración.

La formación de una capa de depósito se puede explicar como sigue:

- Las grandes moléculas (ej.: proteinas y grasas) se transportan por convección hacia la membrana de forma perpendicular a la dirección de flujo.
- Un gradiente de concentración provoca una retrodifusión o difusión en sentido contrario al flujo de permeato.
- Paralelamente a la membrana, las proteinas presentes en la capa cercana a la membrana se mueven a velocidades que varían con el incremento de velocidad de flujo axial.

- El efecto de polarización no está uniformemente distribuido a lo largo de la membrana, especialmente cuando la pérdida de carga da lugar a una presión transmembranar (PTM) diferente a lo largo de la superficie de la membrana. Por lo anterior, el extremo de entrada a la membrana es el que se colmata antes. La polarización se extiende gradualmente sobre toda la superficie, reduciéndose la capacidad y eventualmente haciendo necesaria la parada y limpieza de la planta.
- El efecto principal de la polarización es que la eliminación de permeato decrece conforme se desarrolla la filtración.
- El efecto de la polarización se puede reducir en ciertos casos mediante retroenjuagado, flujo inverso o PTU (que es posible cuando se utilizan membranas cerámicas.

Condiciones de presión

La presión es la fuerza inductora de la filtración. Se debe hacer una clara distinción entre:

1. La presión hidráulica cae a lo largo del módulo, siendo $P = P_1 - P_2$. Cuanto mayor es el valor de P, mayor es la velocidad a través del módulo, mayor es el corte de las membranas y menor es el efecto de polarización. Sin embargo existen restricciones tales como la resistencia a la presión de las membranas y el precio de las bombas capaces de suministrar tanto altos caudales como altas presiones.

2. La presión transmembranar (PTM) es la caida de presión entre los lados de retentato y permeato de la membrana en un punto determinado a lo largo de la membrana. El criterio principal de eficiencia de un sistema de membranas -flujo en $l/m^2.h$- es una función de la PTM.

La PTM, es decir, la fuerza que empuja al permeato a través de la membrana, es mayor en la entrada y menor en el extremo de descarga del módulo. Como la disminución de PTM es lineal, se puede determinar una PTM media mediante la expresión:

$$TMP = \frac{P_1 + P_2}{2} - P_3$$

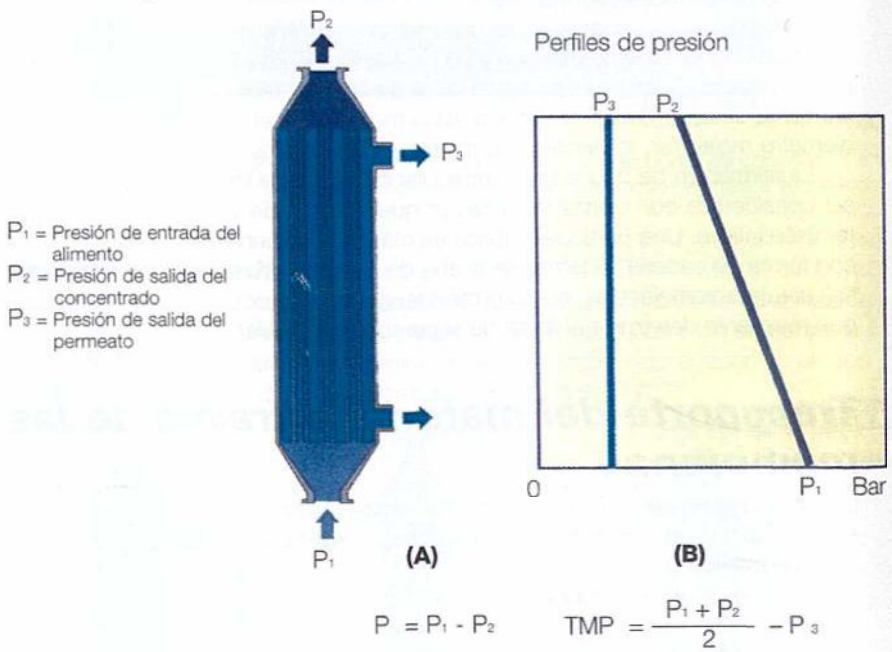


Fig. 6.4.16 *Pérdida de carga hidráulica (A) y transmembranar (B) sobre la membrana.*

En la Figura 6.4.16 se muestra cómo tiene lugar la caida de presión hidráulica a lo largo de la membrana (A), y el perfil de la presión transmembranar (B).

Bases del diseño de una planta de filtración por membranas

La operación de las plantas de filtración por membranas depende básicamente de la presión generada por las bombas utilizadas. Se deben de tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

1. La capacidad de las bombas debe responder a la velocidad de flujo másico (caudal) requerido y a las características de los módulos, que varían ampliamente de acuerdo con el diseño y el tamaño del módulo.

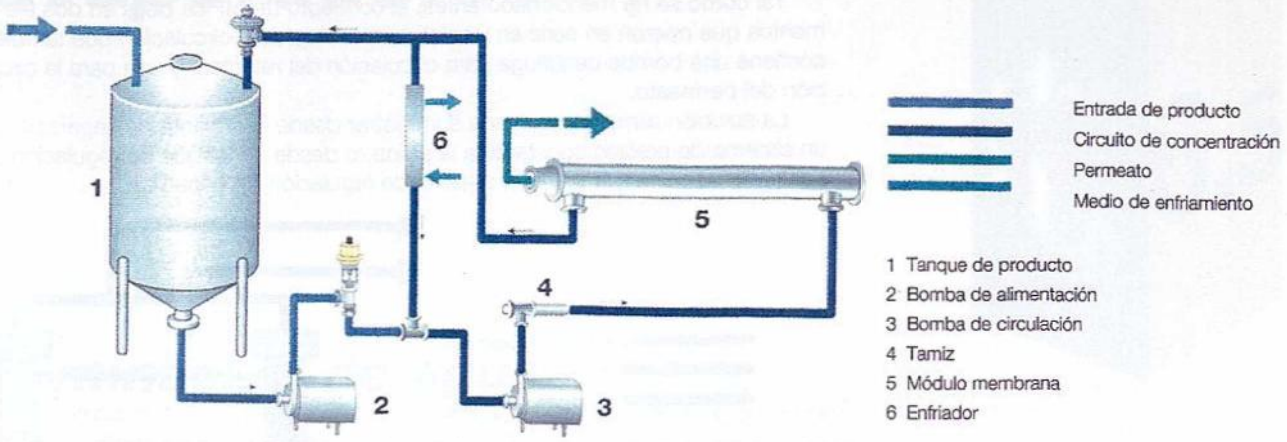


Fig. 6.4.17 *Planta de filtración discontinua por membranas.*

2. Las bombas deben ser insensibles a los cambios de viscosidad de la corriente tratada hasta llegar a la viscosidad límite del módulo. Estas bombas también deben de funcionar de manera eficiente con las temperaturas utilizadas durante el procesado y durante la limpieza.

3. Las bombas deben satisfacer las normas sanitarias del equipamiento de proceso de las industrias lácteas.

Se utilizan bombas de distintos tipos, incluyendo las bombas centrífugas y las de desplazamiento positivo. Las bombas centrífugas sanitarias son las que normalmente se utilizan como bombas de alimentación y bombas de recirculación, aunque las bombas de desplazamiento positivo de tipo sanitario (con diseño especialmente higiénico) se utilizan ocasionalmente como bombas de alimentación a alta presión y como bombas de recirculación de líquidos muy viscosos, así como en las etapas finales de ultrafiltración de leche acidificada.

Las plantas de separación por membranas se pueden utilizar para producción en contínuo o para producción discontínua. La solución alimento no debe contener partículas gruesas, que pueden deteriorar la pared fina de filtración. Por lo anterior, normalmente se instala en el sistema de alimentación a la planta un tamiz de malla fina.

Producción discontinua

Las plantas de producción discontinua (Figura 6.4.17), se utilizan principalmente para la filtración de pequeños volúmenes de producto, por ejemplo en laboratorios y plantas piloto. Una cierta cantidad de producto a ser tratado se mantiene en un tanque pulmón. El producto se recircula a través del separador de membranas hasta que se obtiene la concentración deseada.

Producción continua

En las Figuras 6.4.18 y 6.4.19 se recogen los diseños esquemáticos de plantas de filtración continuas. La planta que se indica en la Figura 6.4.18 es del tipo de diseño en espiral, para aplicaciones de la OI, NF y UF, con membranas de polímero de diferentes tamaños de poro, mientras que la que se indica en la Figura 6.4.19 es una planta de MF con membranas cerámicas.

Como las membranas de OI son mucho más cerradas (de menor tamaño de poro) que las membranas de las otras aplicaciones, se necesitan mayores presiones de entrada. Esta presión se consigue mediante tres bombas centrífugas sanitarias conectadas en serie y una bomba centrífuga de circulación.

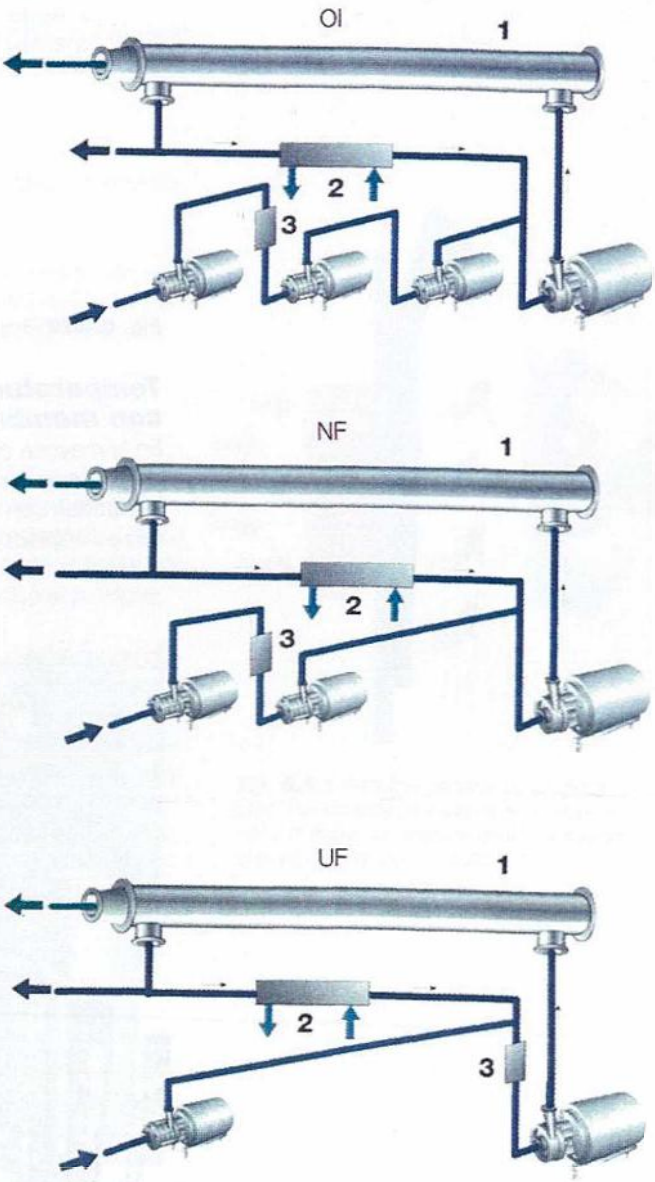


Fig. 6.4.18 *Principios de diseño de diferentes circuitos de filtración.*
1 Membrana
2 Enfriador
3 Tamiz

Las otras dos plantas de filtración, NF y UF, tienen membranas más abiertas, por lo que pueden funcionar con dos bombas de alimentación y una respectivamente.

Tal como se ha mencionado antes, el concepto de MF se basa en dos elementos que operan en serie en un sistema de filtro de recirculación que también contiene una bomba centrífuga para circulación del retentato y una para la circulación del permeato.

La solución alimento se puede suministrar desde una planta de separación con un sistema de presión constante a la salida, o desde un tanque de regulación equipado con una bomba y un sistema de regulación de capacidad.

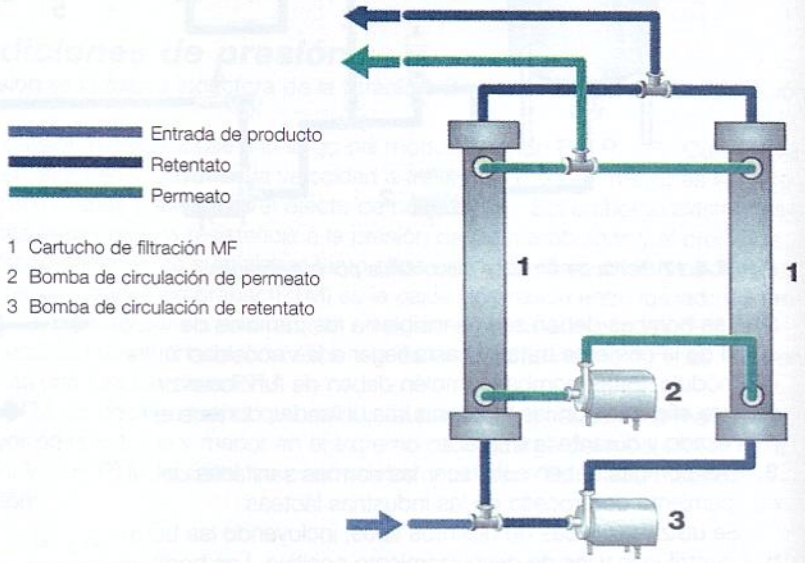


Fig. 6.4.19 *Principio de diseño del circuito de filtración MF.*

Temperatura de trabajo en las aplicaciones de la filtración con membranas

En la mayoría de los casos, la temperatura de proceso es del orden de 50ºC en las aplicaciones de la industria láctea. Las plantas de filtración van normalmente equipadas con un sistema simple de enfriamiento integrado en el circuito interno de recirculación para compensar el ligero aumento de temperatura que tiene lugar durante la operación y para mantener una temperatura de proceso constante.

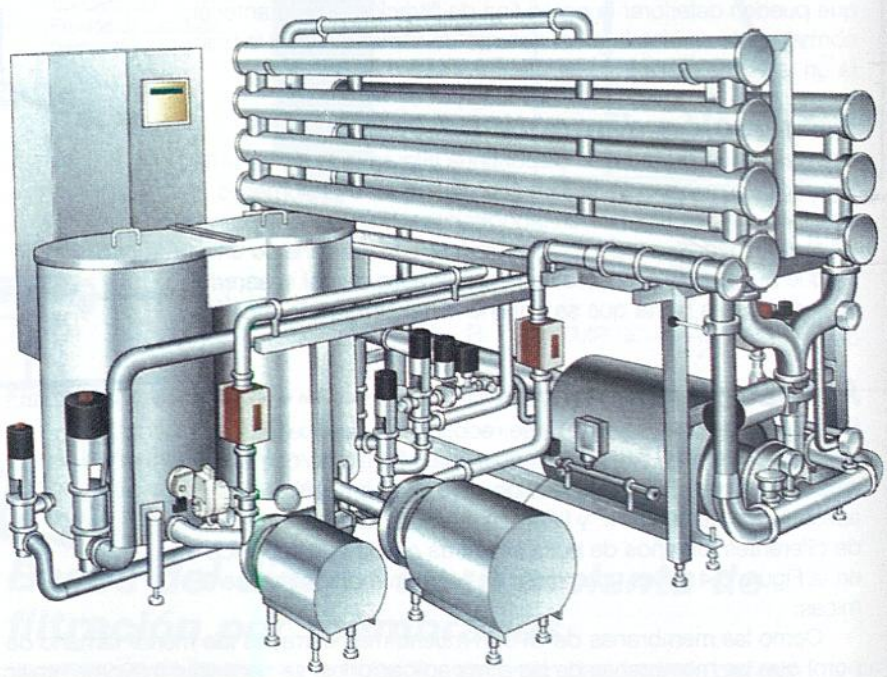


Fig. 6.4.20 *Módulo de producción para procesado en UF.*

Evaporadores

Eliminación de agua

La concentración de un líquido implica la eliminación de un disolvente, en la mayoría de los casos agua. La concentración se distingue del secado en que el producto final -el concentrado- es aún líquido.

Existen varias razones para la concentración de alimentos líquidos, por ejemplo para:

- reducir el coste del secado
- inducir la cristalización
- reducir costes de almacenamiento y transporte
- reducir la actividad de agua con el fin de incrementar la estabilidad microbiológica y química
- recuperar subproductos de las corrientes efluentes

La concentración de un líquido por evaporación bajo vacío fue introducida en 1913. El proceso se basaba en una patente británica de E.C. Howard que consistía en una caldera a vacío de doble fondo calentada por vapor con un condensador y una bomba de aire.

Evaporación

En la industria láctea la evaporación se usa en la concentración de productos como la leche, leche desnatada y lactosuero. También se utiliza como tratamiento preliminar antes del secado. La leche que se produce para obtener leche en polvo se concentra normalmente desde un contenido inicial de sólidos de 9 - 13% hasta una concentración final de 40 - 50% de sólidos totales antes de que el producto sea bombeado hasta el secadero.

La evaporación en la industria láctea consiste en la ebullición y eliminación del agua de la solución. Para conseguir que esto se produzca se ha de añadir calor. El producto que se va a evaporar normalmente es sensible al calor y su calidad puede verse seriamente deteriorada como consecuencia de la aplicación de niveles de temperatura relativamente elevados. Para reducir este impacto negativo del calor, la evaporación se ha de realizar a vacío, algunas veces a temperaturas tan bajas como 40ºC. Al mismo tiempo el evaporador se ha de diseñar para tiempos de residencia lo más cortos posibles. La mayoría de los productos pueden ser concentrados con buenos resultados dado que el evaporador se diseña para trabajar a bajas temperaturas y con tiempos de mantenimiento cortos.

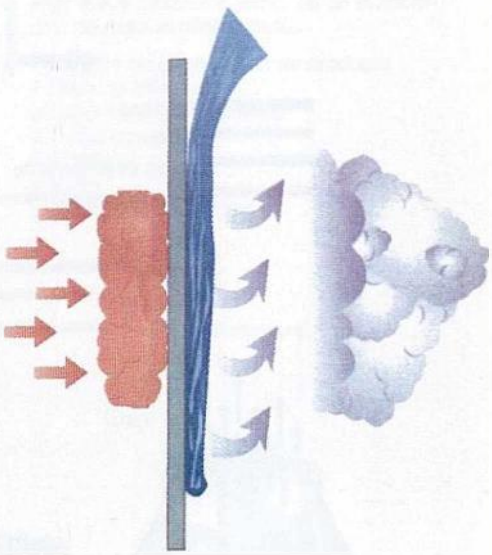


Fig. 6.5.1 *Principio general de evaporación. Por un lado se calienta mediante vapor y el vapor se evapora desde el líquido que se tiene al otro lado de la pared.*

Diseño del evaporador

Se necesita una cantidad elevada de energía para llevar a ebullición al agua en la solución. Esta energía se suministra por medio de vapor. Para reducir la cantidad de vapor necesario, las unidades de evaporación se diseñan normalmente como evaporadores de multiple efecto. En estos equipos se tienen dos o más unidades que operan a presiones cada vez más bajas en cada efecto, consiguiéndose así un punto de ebullición cada vez más bajo. En estos diseños el vapor producido en el efecto anterior se utiliza como medio de calentamiento en el efecto siguiente. El resultado es que la cantidad de vapor necesaria es aproximadamente igual a la cantidad total de agua evaporada dividida por el número de efectos. En la industria láctea se utilizan actualmente evaporadores hasta de siete efectos.

También, se puede utilizar la electricidad como fuente alternativa de energía. En este caso se utilizan compresores o ventiladores eléctricos de gran potencia para recomprimir el vapor saliente del efecto hasta la presión necesaria en el vapor para ser utilizado como medio de calentamiento.

Aunque las plantas de evaporación trabajan generalmente sobre el mismo principio, difieren normalmente en los detalles de diseño. Los tubos cuyas paredes separan el vapor del producto pueden tener una disposición horizontal o vertical, y el vapor puede circular por el interior o por el exterior de los tubos. En la mayoría de los casos el producto circula por el interior de los tubos verticales, mientras que el vapor se aplica por el exterior de los tubos. Para solucionar la zona de intercambio de calor se pueden utilizar tubos, placas, casettes o laminas.

Evaporadores de circulación forzada

Estos equipos se suelen utilizar cuando se trata de conseguir un bajo grado de concentración o cuando se van a procesar pequeñas cantidades de producto.

Por ejemplo, durante la producción de yogur se utiliza la evaporación para concentrar la leche de 1.1 a 1.25 veces, o lo que es lo mismo, desde el 13% hasta el 14.5%, o hasta el 16.25%, de contenido de sólidos, respectivamente. En este tratamiento tiene lugar de forma simultánea una desaireación y una eliminación de malos olores del producto.

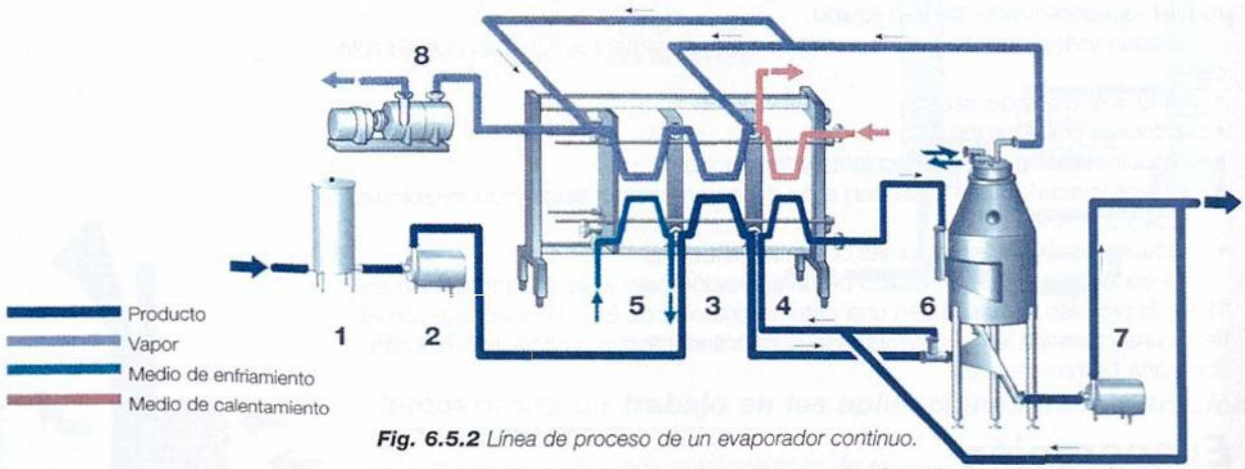


Fig. 6.5.2 *Línea de proceso de un evaporador continuo.*

1	*Tanque de regulación*	5	*Sección de enfriamiento/condensador*
2	*Bomba de alimentación*	6	*Cámara de vacio*
3	*Sección de precalentamiento/condensador*	7	*Bomba de recirculación*
4	*Sección de ajuste de temperatura*	8	*Bomba de vacio*

El proceso de evaporación por circulación forzada aparece en la Figura 6.5.2. La leche calentada a 90ºC pasa a una cámara de vacío, de forma tangencial y a una alta velocidad, formando una capa fina que gira sobre la superficie de la pared de dicha cámara, como se ve en la Figura 6.5.3. Durante la rotación sobre la pared, parte del agua se evapora y los vapores formados se llevan hasta el condensador. El aire y otros gases no condensables son extraídos desde el condensador por una bomba de vacío.

El producto eventualmente pierde velocidad y cae hacia el centro del fondo inclinado, desde donde se descarga. Parte del producto se recircula por medio de una bomba centrífuga a través de un intercambiador de calor donde se produce un ajuste de temperatura, siendo entonces recirculado a la cámara de vacío para continuar el proceso de evaporación. Con el fin de conseguir el grado de concentración que se desea, se debe recircular una gran cantidad de producto. El caudal a través de la cámara de vacío es de 4 a 5 veces el caudal de entrada en la planta.

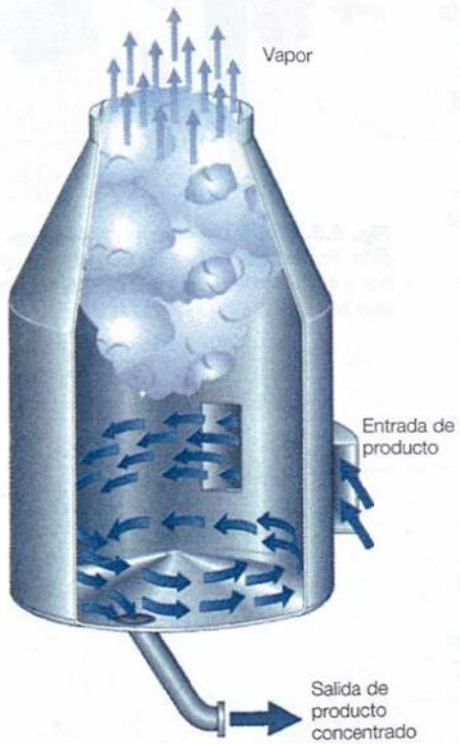


Fig. 6.5.3 *Flujo de producto en una cámara de vacio.*

Evaporadores de película descendente

El evaporador de película descendente es el tipo más frecuentemente utilizado en las industrias lácteas. En este tipo de evaporadores la leche se introduce por la parte superior de una superficie de intercambio dispuesta verticalmente, de manera que se forma una fina capa que fluye de arriba a bajo sobre la superficie de calentamiento. La superficie de calentamiento puede ser de tubos o placas de acero inoxidable. Las placas se agrupan juntas formando un paquete donde el producto

circula por una de las caras de la placa y el vapor por la otra. Cuando se utilizan tubos, la leche forma una película por el interior de los tubos, que están rodeados por vapor. El producto primero se precalienta a una temperatura igual o ligeramente superior a la existente en el evaporador (Figura 6.5.4). Desde el precalentador, el producto fluye hasta la sección superior del evaporador. Creando un vacío en el evaporador se conseguirá la temperatura de evaporación deseada, inferior a 100°C.

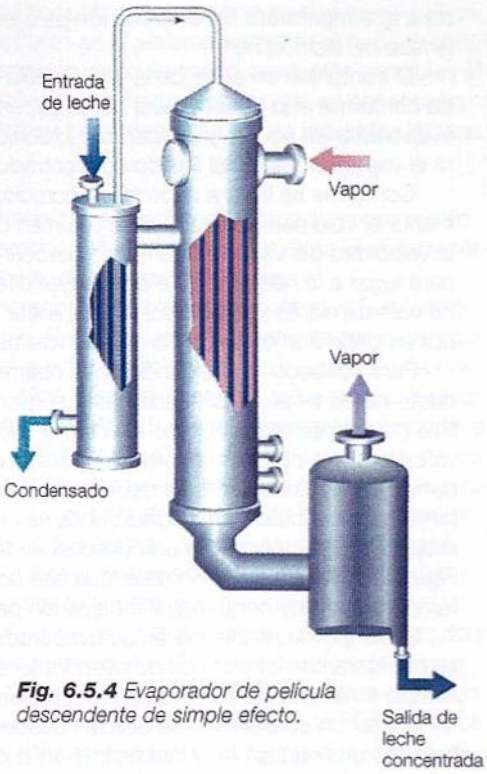


Fig. 6.5.4 *Evaporador de película descendente de simple efecto.*

Evaporador de tipo tubular

La clave del éxito de un evaporador de película descendente es obtener una distribucion uniforme de la leche sobre la superficie de calentamiento. Esto se puede conseguir de varias maneras.

En un evaporador de tipo tubular, ésto se puede conseguir, tal como se indica en la Figura 6.5.5, por medio de unas boquillas de diseño especial (1), que distribuye el producto sobre una placa de distribución (2). El producto ha sido sobrecalentado ligeramente y, por lo tanto, se expande nada más salir de la boquilla. Parte del agua se vaporiza de forma inmediata, y el vapor formado fuerza al producto a entrar en los tubos y a descender por sus paredes en forma de una capa delgada.

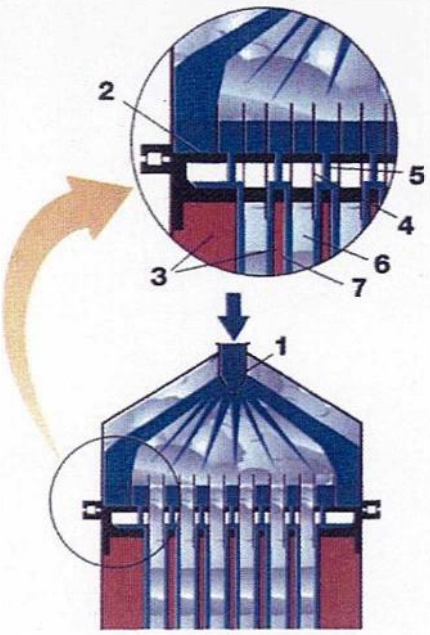


Fig. 6.5.5 *Sección superior de un evaporador de película descendente.*

1 Boquilla de alimentación de producto
2 Plato de distribución
3 Vapor para calentamiento
4 Tubos coaxiales
5 Aberturas
6 Vapor
7 Tubos del evaporador

Evaporador de placas

La distribución en un evaporador de placas de película descendente se puede conseguir por medio de dos tuberías que atraviesan el paquete de placas. Para cada placa de producto se tiene una boquilla de aspersión (ref. 1 de la Figura 6.5.6) en cada tubería de producto que lo distribuye en una película delgada y uniforme sobre la superficie de la placa. En este caso el producto en-

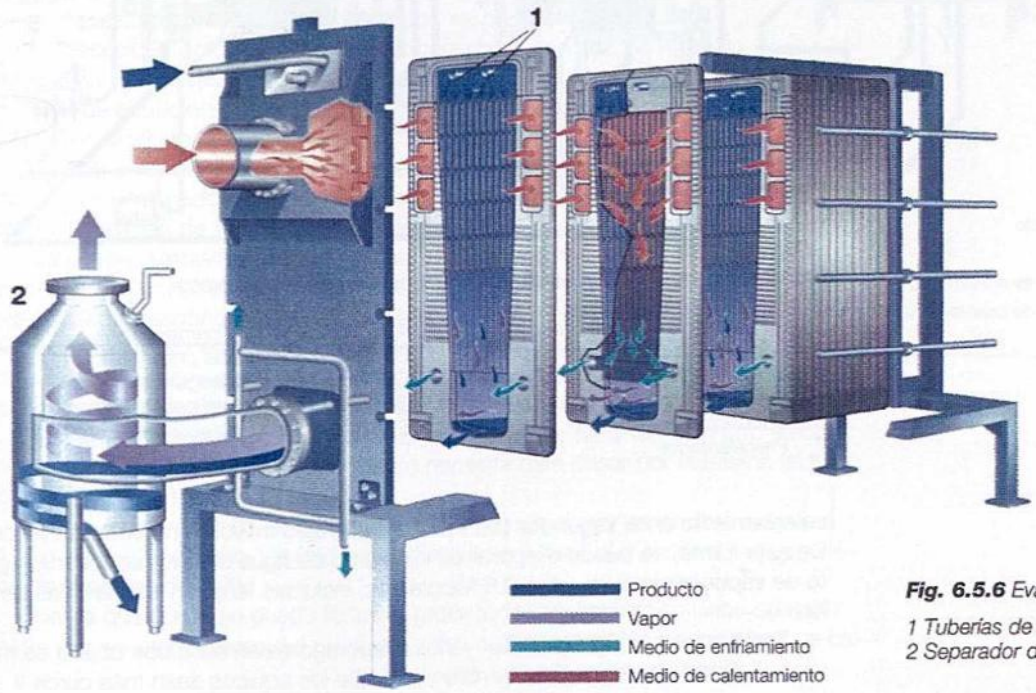


Fig. 6.5.6 *Evaporador de placas.*

1 Tuberías de distribución.
2 Separador de vapor.

tra a la temperatura de evaporación para evitar la evaporación instantánea durante la fase de distribución.

El contenido en agua de la fina película de producto se evapora de forma rápida conforme el producto pasa por la superficie de intercambio. En la salida del evaporador se acopla un separador ciclónico de vapor (2). Este componente separa el vapor formado del líquido concentrado.

Conforme se lleva a cabo la evaporación, el volumen de líquido decrece y aumenta el volumen de vapor. Si el volumen de vapor excede el espacio disponible, la velocidad del vapor aumentará, provocándose una caída de presión mayor. Esto dará lugar a la necesidad de una mayor diferencia de temperaturas entre el vapor de calentamiento y el producto. Para evitar esto, el espacio disponible para el vapor se debe aumentar conforme se incrementa el vapor formado.

Para conseguir unas condiciones óptimas de evaporación, la película de producto ha de tener aproximadamente el mismo espesor a lo largo de toda la superficie de calentamiento. Como el volumen de líquido disponible disminuye conforme va cayendo el producto sobre la superficie de calentamiento, el perímetro de la superficie de calentamiento se debe ir disminuyendo para mantener el espesor constante de la película. Estas condiciones se consiguen con el diseño de placa del evaporador de casette de película descendente como el que se muestra en la Figura 6.5.6. Esta solución hace que sea posible evaporar utilizando diferencias de temperatura muy pequeñas y a bajas temperaturas.

El tiempo de residencia en un evaporador de película descendente es corto si se compara con otros tipos de evaporadores. La combinación de temperatura y tiempo en el evaporador determina el impacto térmico sobre el producto.

Utilizar un evaporador de película descendente con un perfil de temperaturas bajas es una ventaja muy interesante en la concentración de productos lácteos que son sensibles al tratamiento térmico.

Evaporación de efecto múltiple

Normalmente se recurre a la evaporación de efecto múltiple. En teoría, si se conectan dos evaporadores en serie, el segundo puede funcionar con un vacío superior (y, por lo tanto, a una temperatura inferior) que el primero. El vapor separado del producto en el primer efecto puede ser entonces utilizado como medio de

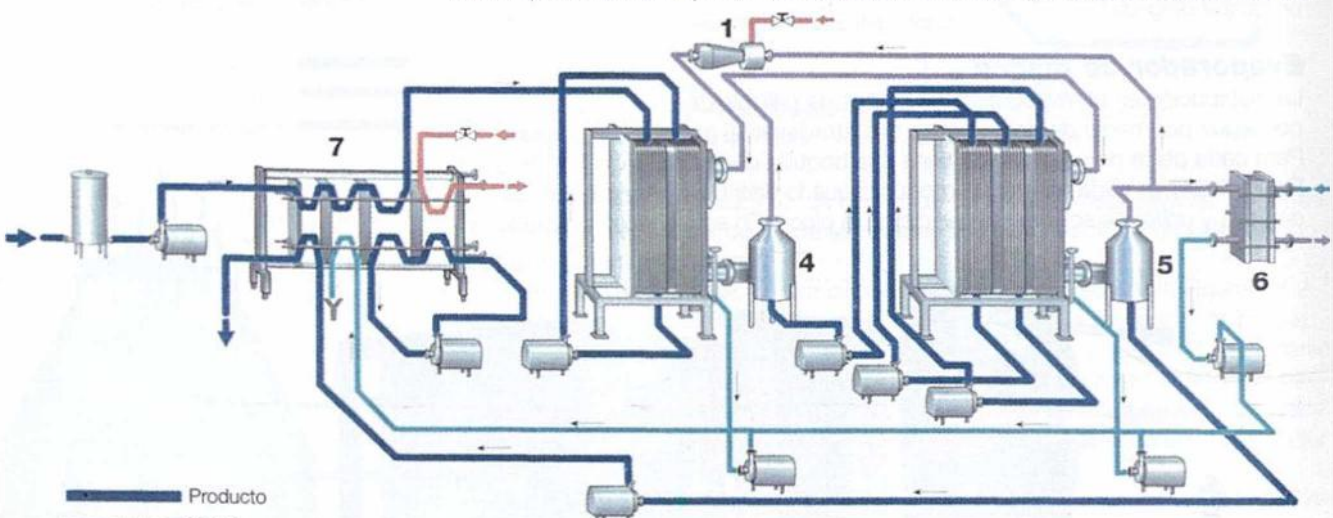


Fig. 6.5.7 *Evaporador de placas de dos efectos con termocompresor.*

1	*Termocompresor*		
2	*Primer efecto de evaporación*	*A*	*Primer paso del primer efecto*
3	*Segundo efecto de evaporación*	*B*	*Segundo paso del primer efecto*
4	*Separador de vapor del primer efecto*	*C*	*Primer paso del segundo efecto*
5	*Separador de vapor del segundo efecto*	*D*	*Segundo paso del segundo efecto*
6	*Condensador de placas*	*E*	*Tercer paso del segundo efecto*
7	*Precalentador*		

calentamiento en el segundo, que trabaja a un vacio mayor (temperatura inferior). De esta forma, se puede evaporar un kilogramo de agua del producto con un gasto de vapor primario de unos 0.6 kilogramos, incluidas también las pérdidas de calor.

También, es posible conectar varios evaporadores en serie con objeto de mejorar el ahorro de vapor. Esto tambien hará que los equipos sean más caros y

complicados de manejar. También se necesita una temperatura superior en el primer efecto, y el volumen total de producto en el sistema aumenta al hacerlo el número de efectos. Esto es una desventaja cuando se tratan productos sensibles al calor. Sin embargo, con objeto de reducir el consumo de energía se construyen evaporadores de hasta 7 efectos para su funcionamiento en las industrias lácteas.

Termocompresión

El vapor disipado por el producto puede ser comprimido y utilizado como medio de calentamiento en el propio evaporador. De esta forma se mejora la eficacia térmica del mismo. Para este propósito se utiliza el termocompresor.

La Figura 6.5.7 muestra un evaporador de doble efecto dotado de un termocompresor, para evaporación de leche. Parte del vapor procedente del separador de vapor pasa al termocompresor, al que se suministra también vapor a alta presión (600-1.000 kPa). El compresor utiliza la alta presión del vapor para aumentar la energía cinética, con lo que el vapor es eyectado a alta velocidad a través de la boquilla. En la eyección se produce una mezcla del vapor de alta presión y de los vahos procedentes del producto, comprimiéndose la citada mezcla hasta alcanzar una presión superior. Un evaporador de un solo efecto provisto de un termocompresor es tan económico como uno de dos efectos que no disponga de termocompresor. Utilizando la técnica de la termocompresión en conjunción con los evaporadores de varios efectos se optimiza el consumo de energía.

La leche se bombea desde un depósito regulador hasta el pasteurizador, donde se pasteuriza la leche y se ajusta su temperatura a la de ebullición del primer efecto. La leche continua hasta el primer efecto (2) del evaporador, que está bajo un vacío que se corresponde con una temperatura de ebullición de 60°C. El agua se evapora y la leche se concentra conforme pasa la fina película a través de los dos pasos de placas.

El concentrado se separa de los vahos en el ciclón (4) y se bombea al segundo efecto (3). En este efecto el vacío es mayor, y se corresponde con una temperatura de 50°C.

Después de una nueva evaporación en el segundo efecto, el concentrado es separado de los vahos en el ciclón (5) y bombeado fuera de la planta via precalentador (7).

Mediante la inyección de vapor a alta presión en el termocompresor (1) se aumenta la presión del vapor disipado del producto en el segundo efecto. La mezcla del vapor a alta presión con los vahos generados por el producto se utiliza como medio calefactor en el primer efecto (2).

Eficiencia de la evaporación

Un evaporador de película descendente con termocompresor y dos efectos necesita unos 0.25 kg de vapor para evaporar 1 kg de agua, y si se trata de un evaporador de 5 efectos se necesitan unos 0.20 kg de vapor. Sin la termocompresión serían necesarios 0.60 y 0.40 kg de vapor, respectivamente.

Un evaporador de cinco efectos con termocompresor necesita unos 0.20 kg de vapor para evaporar 1 kg de agua.

La necesidad actual de disminur los consumos energéticos ha dado lugar a la instalación de plantas con más de 6 efectos. En un evaporador, la temperatura máxima de ebullición suele ser de 70°C en el lado del producto en el primer efecto y 40°C en el último.

La diferencia de temperaturas entre 40°C y 70°C nos da un margen de 30°C para el dimensionado de la planta. Cuanto mayor sea el número de efectos, menores diferencias de temperatura pueden existir en cada efecto individual.

Se pierde también diferencia de temperatura en forma de caidas de presión y aumentos del punto de ebullición. La suma de éstos en una planta de efecto múltiple puede corresponderse con una diferencia de temperaturas de 5-15°C. Por ello, se necesitan mayores superficies de transferencia de calor e inversiones iniciales más fuertes. Unas superficies de transferencia de calor más grandes implican unas mayores necesidades de distribución eficaz del líquido sobre estas superficies.

El aumento de la superficie de transmisión de calor tiene también otro efecto negativo, y es el tiempo que el producto necesita para pasar por la misma (el tiempo de residencia), es ahora superior.

En un evaporador de siete efectos con termocompresor es posible evaporar 12 kg de agua con sólo 1 kg de vapor. Esto quiere decir que el consumo específico de vapor es de 0.08.

Hasta qué punto se puede forzar el proceso de concentración viene determinado por las propiedades del producto, tales como viscosidad y sensibilidad al ca-

lor. En el caso de la leche desnatada y de la leche entera, la concentración se realiza como máximo hasta un 48% y un 52%, respectivamente.

El evaporador debe tener un efecto de acabado (espesador), con objeto de poder obtener concentrados con contenidos superiores en sólidos.

Recompresión mecánica del vapor

A diferencia del termocompresor, el sistema de recompresión mecánica del vapor absorbe todo el vapor saliente del evaporador y lo comprime antes de retornarlo al evaporador.

El aumento de presión se consigue a base de energía mecánica, utilizada en el motor de accionamiento del compresor. No se suministra energía térmica al evaporador (excepto vapor para la pasteurización en el primer efecto). No existe un exceso de vapor que tenga que ser condensado.

En la recompresión mecánica del vapor, todo el vapor se recircula en la planta. Con ello se consigue un alto grado de recuperación térmica.

La Figura 6.5.8 muestra una planta de tres efectos con recompresión mecánica del vapor. El vapor recomprimido vuelve desde el compresor (3) hasta el primer efecto (4) para calentar al producto. El vaho producido en el primer efecto se utiliza entonces para calentar el segundo efecto, y el vapor que se obtiene del producto en el segundo efecto se utiliza en el tercero, y así sucesivamente.

En el compresor, la presión del vapor se aumenta desde 20 a 32 kPa, aumentando la temperatura de condensación desde 60 a 71°C.

Los 71°C de temperatura de condensación no son suficientes para la pasteurización del producto en el primer efecto. Por ello, se instala un termocompresor (1) antes del primer efecto, con objeto de aumentar la temperatura de condensación hasta el valor requerido.

Después de la separación de vaho en el tercer efecto, el vapor continua hasta un pequeño condensador donde se elimina el exceso de vapor procedente de la inyección de vapor. El condensador también controla el equilibrio térmico en el evaporador.

La recompresión mecánica del vapor hace posible evaporar 100-125 kg de agua con 1 kW. Utilizando un evaporador de tres efectos con una recompresión mecánica del vapor se pueden reducir a la mitad los costes de operación, en comparación con un evaporador convencional de siete efectos provisto de un termocompresor.

Para lograr la recompresión mecánica del vapor se pueden utilizar ventiladores de alta velocidad. Se utilizan de la misma manera que otros tipos de compresores, pero sobre todo cuando el aumento necesario de temperatura es sólo de pocos grados.

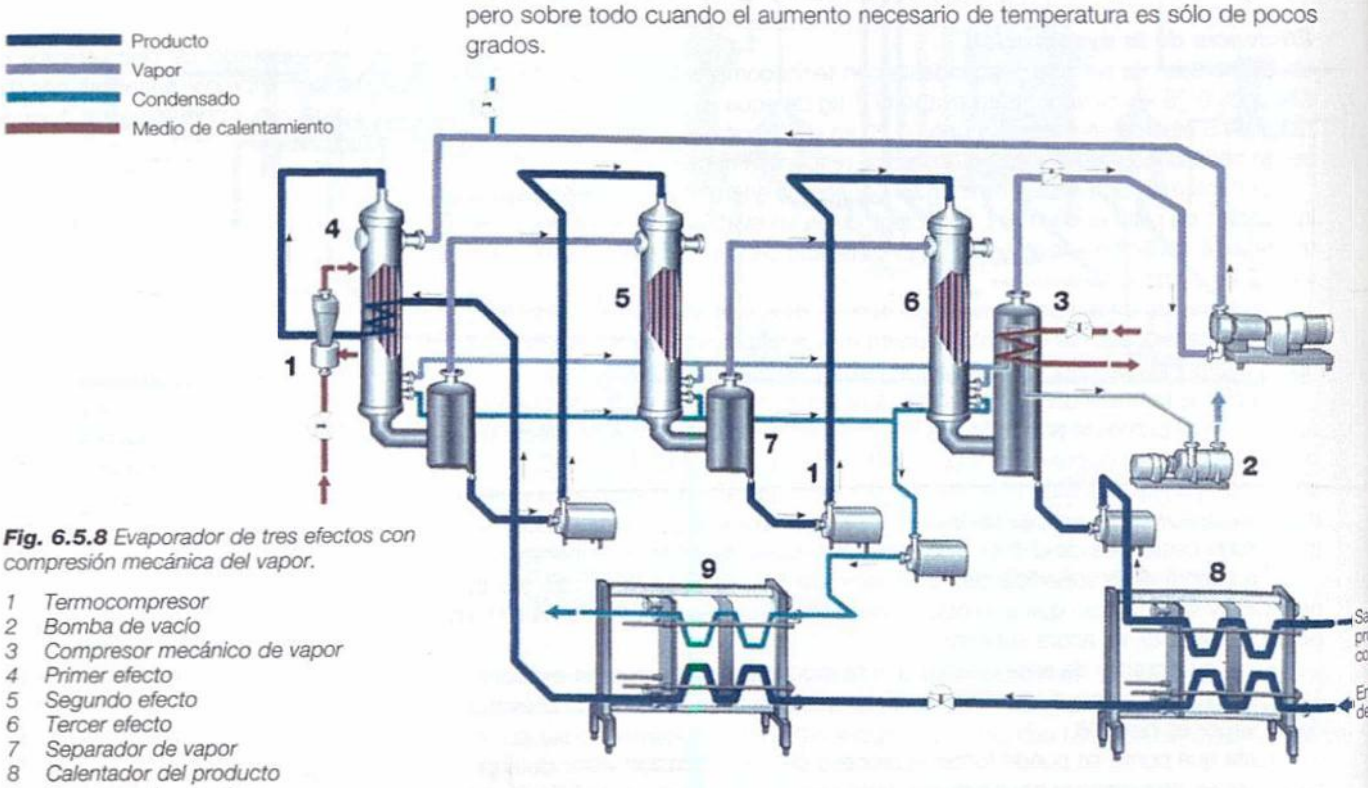


Fig. 6.5.8 *Evaporador de tres efectos con compresión mecánica del vapor.*

1 *Termocompresor*
2 *Bomba de vacío*
3 *Compresor mecánico de vapor*
4 *Primer efecto*
5 *Segundo efecto*
6 *Tercer efecto*
7 *Separador de vapor*
8 *Calentador del producto*
9 *Condensador de placas*

Desaireadores

Aire y gases en la leche

La leche siempre tiene cantidades más o menos grandes de aire y otros gases. El volumen de aire en la leche en la ubre viene determinado por el contenido de aire de la sangre de la vaca. El contenido de oxígeno (O_2) es bajo, ya que está químicamente ligado a la hemoglobina de la sangre, pero el contenido de anhídrido carbónico (CO_2) es alto ya que la sangre transporta grandes volúmenes de CO_2 desde las células hasta los pulmones. El volumen total de aire en la leche en la ubre puede ser del 4.5-6%, del cual el O_2 supone alrededor del 0.1%, el N_2 (nitrógeno) alrededor del 1% y el CO_2 el 3.5-4.9%.

La leche es expuesta al aire en diversas ocasiones durante el ordeño. El oxígeno atmosférico se disuelve en la leche, mientras que el CO_2 se disipa de la leche. Parte del aire no se disuelve en la leche pero permanece en ella en una forma finamente dispersa, a menudo adherido a la grasa.

Tras el ordeño y recogida en cántaras o tanques de enfriamiento, la leche puede contener un 5.5-7.0% de aire en volumen, siendo el 6% una cifra promedio. Ver la Tabla 6.6.1.

El equilibrio que prevalece entre estos tres estados de agregación viene determinado por la temperatura y la presión atmosférica. Cuando la temperatura aumenta, durante la pasteurización por ejemplo, el aire disuelto pasa de estar en solución a estar en dispersión. Se trata de aire disperso que causará problemas en el tratamiento de la leche.

Fig. 6.6.1 *La leche en la ubre contiene un 4.5-6% de gases.*

Tabla 6.1
Contenido de gas (% en volumen) en la leche cruda mezclada comercial

	Oxígeno	Nitrógeno	Dióxido de carbono	Gas total
Mínimo	0.30	1.18	3.44	4.92
Máximo	0.59	1.63	6.28	8.50
Media	0.47	1.29	4.45	6.21

El aire en la leche se encuentra de tres formas:
1. Disperso
2. Disuelto
3. Químicamente ligado

Más aire mezclado

Durante el manejo en la granja, el transporte a la industria láctea, y la recepción en ésta, se introduce más aire en la leche. No es raro que la leche entrante en la fábrica tenga un 10% de aire en volumen o incluso más. En esta etapa predomina el aire disperso finamente o groseramente. Básicamente, los problemas que causa el aire disperso son:

- Imprecisión en la medida volumétrica de la leche.
- Incrustación en las superficies de intercambio en los pasteurizadores (ensuciamiento).
- Eficiencia reducida de desnatado en las separadoras.
- Pérdida de precisión en la normalización automática continua.
- Concentración de aire en la nata, que da lugar a
  -normalización incorrecta del contenido de grasa,
  -incrustación en los calentadores de nata,
  -"pre-batido" que provoca

El aire disperso causa problemas.

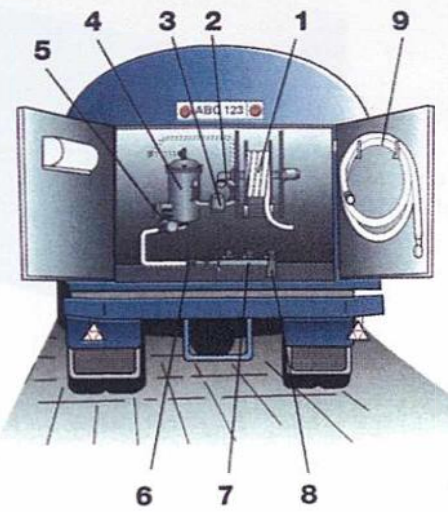


Fig. 6.6.2 *Parte posterior de una cisterna de leche.*

1. *Manguera para la carga de leche en la granja*
2. *Colador*
3. *Bomba*
4. *Eliminador de aire*
5. *Dispositivo de medida*
6. *Válvula antirretorno*
7. *Grupo de válvulas*
8. *Salida de tanque*
9. *Manguera para descarga de la leche en la industria láctea.*

* pérdida de rendimiento en la producción de mantequilla,
* adhesión de grasa libre en la parte superior de los envases.

- Reducción de la estabilidad de los productos lácteos fermentados (expulsión de lactosuero).

Por todo ello se utilizan distintos métodos de desaireación para evitar el deterioro de la producción y de la calidad de los productos.

Eliminación de aire y recogida de la leche

Cuando la leche se recoge en cisternas, a partir de cántaras o tanques de enfriamiento de leche, la leche de cada granja se mide normalmente con un caudalímetro durante el bombeo. Para conseguir medidas de volumen precisas, la leche se debe pasar a través de un eliminador de aire justo antes de pasar por el caudalímetro. La mayoría de las cisternas están, entonces, provistas de eliminadores de aire, a través de los cuales debe pasar la leche de cada granjero antes de ser medida y antes de ser bombeada a la cisterna.

Uno de estos sistemas (Wedholms, S) se muestra en la Figura 6.6.2. El equipo de bombeo se dispone en una cabina en la parte posterior de la cisterna. El objetivo de este equipo es colar, bombear, eliminar aire y medir el volumen de la leche antes de que ésta entre en los tanques de recogida de la cisterna.

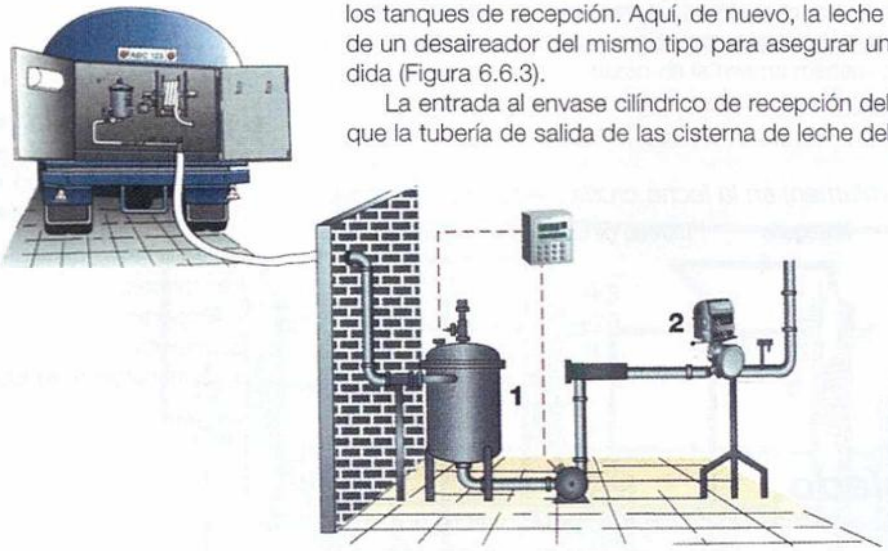
La manguera de aspiración (1) se conecta a la cántara del granjero y/o a los tanques de enfriamiento. La leche se aspira a través de un colador (2) y se bombea hacia el eliminador de aire (4). La bomba de desplazamiento positivo (3) es autoaspirante.

Al mismo tiempo que aumenta el nivel de leche en el eliminador de aire, la boya interior también sube. Cuando se alcanza cierto nivel, el flotador cierra la válvula situada en la parte superior del envase. La presión en el interior de este envase aumenta y la válvula antirretorno (6) se abre. La leche fluye pasando a través de la unidad de medida (5) hacia la válvula de cierre (7) y el tanque de la cisterna. La cisterna se vacía a través de la salida (8) por medio de la manguera (9).

Recepción de la leche

A la llegada de la leche a la industria de nuevo contendrá aire disperso como consecuencia de la agitación de la cisterna durante el transporte por caminos y carreteras hasta la industria. Normalmente la leche se mide conforme se bombea hacia los tanques de recepción. Aquí, de nuevo, la leche deberá pasar primero a través de un desaireador del mismo tipo para asegurar una adecuada precisión en la medida (Figura 6.6.3).

La entrada al envase cilíndrico de recepción debe situarse en un nivel más bajo que la tubería de salida de las cisterna de leche del vehículo, ya que la leche no



debe ser bombeada hacia el envase sino transferida por gravedad. Este sistema se puede manejar manualmente o automáticamente.

En ambos casos la eficiencia de eliminación de aire depende mucho de lo finamente disperso que esté el aire. Cuanto más pequeñas sean las burbujas de aire más difícil será su eliminación.

Tratamiento por vacío

La desaireación por vacío se ha utilizado con éxito en la eliminación de aire de la leche, aire disuelto y aire finamente disperso en burbujas. La leche precalentada se introduce en un depósito o cámara de expansión (Figura 6.6.4), en el que el vacío

se ajusta hasta un nivel equivalente a un punto de ebullición de unos 7-8ºC por debajo de la temperatura de precalentamiento. Si la leche entra en el depósito a 68ºC, la temperatura caerá inmediatamente a 68-8 = 60ºC. La caida de presión provoca la salida del aire disuelto, que burbujea junto con una cierta cantidad de leche.

El vapor pasa a través de un condensador interior dispuesto en el propio depósito, condensa, y se retorna a la leche, mientras que el aire desprendido, junto con los gases no condensables (ciertos malos olores también) se elimina fuera del depósito por medio de la bomba de vacío.

En la fabricación de yogur el depósito a vacío no va provisto de condensador, ya que la leche destinada a yogur está ligeramente concentrada (15-20%). La condensación del vapor se realiza en el exterior del depósito.

Desaireción en la línea de tratamiento de la leche

La leche entera es suministrada al pasteurizador y calentada hasta 68ºC. En este caso procede del depósito de expansión de tratamiento por vacío. Para optimizar la eficiencia, la leche entra a la cámara de vacío tangencialmente a través de una entrada amplia, que provoca una distribución de una fina película sobre la pared. La expansión del vapor procedente de la leche en la entrada acelera el flujo de la leche hacia la parte inferior de la pared.

En el camino de descenso hacia la salida, que se localiza también tangencialmente, la velocidad decrece. De esta manera las capacidades de entrada y descarga son idénticas.

La leche desaireada, ahora a una temperatura de 60ºC, se desnata, se normaliza y se homogeneiza antes de retornar al pasteurizador para sufrir el tratamiento térmico final.

Si se tiene una separadora integrada en la linea de proceso, se debe colocar un controlador de flujo antes de la separadora para mantener un caudal constante a través del desaireador. En este caso el homogeneizador debe estar provisto de una tubería de recirculación. En una linea de proceso sin separadora, el homogeneizador (sin una tubería de recirculación) mantendrá el caudal constante a través del desaireador.

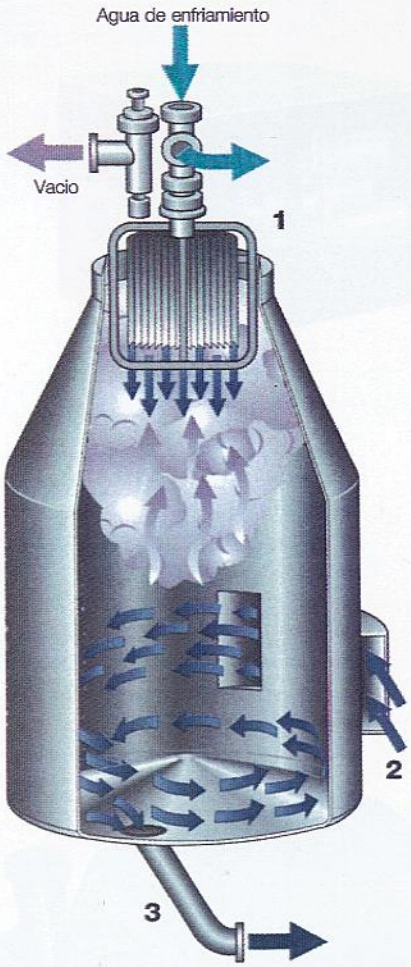


Fig. 6.6.4 *Flujo de leche y aire en un desaireador a vacío dotado de condensador interior.*

1. *Condensador*
2. *Entrada tangencial de leche*
3. *Salida de leche con sistema de control de nivel*

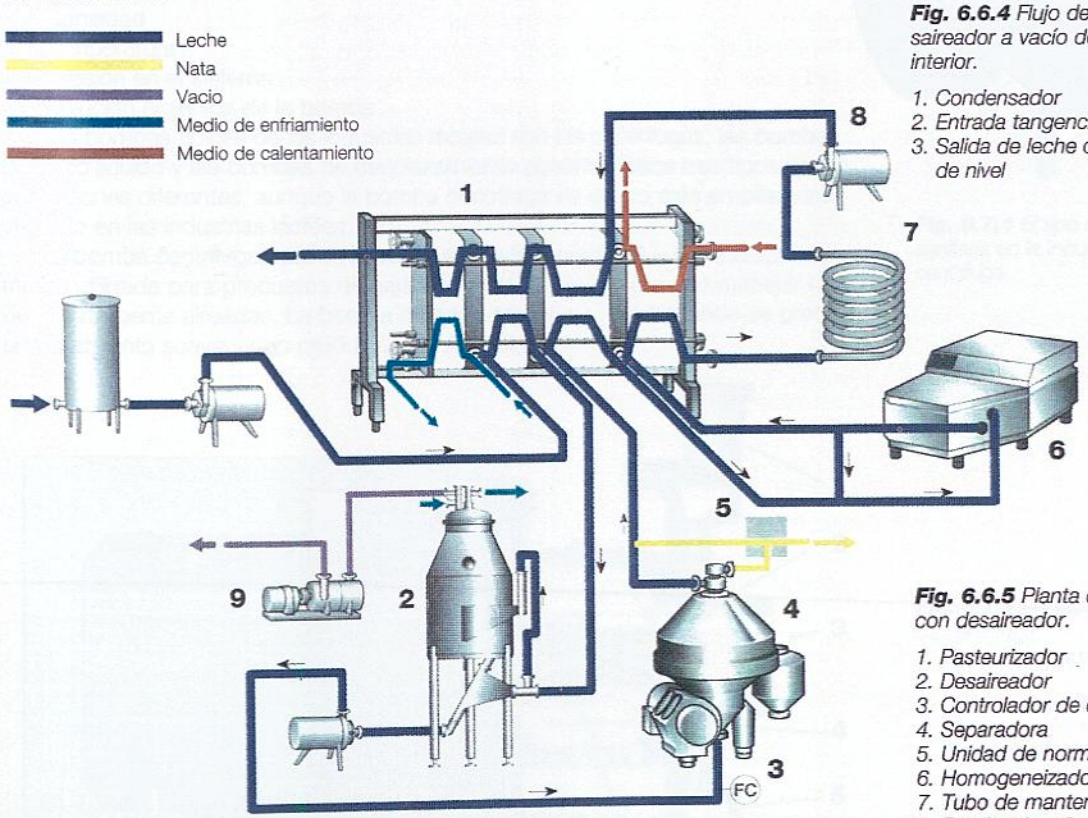


Fig. 6.6.5 *Planta de tratamiento de leche con desaireador.*

1. *Pasteurizador*
2. *Desaireador*
3. *Controlador de caudal*
4. *Separadora*
5. *Unidad de normalización*
6. *Homogeneizador*
7. *Tubo de mantenimiento*
8. *Bomba de refuerzo*
9. *Bomba de vacio*

Bombas

Necesidades de bombeo

Las exigencias de los procesos de fabricación han aumentado de forma constante sobre todo en lo que respecta a calidad de producto y eficacia de procesado. Inicialmente, era frecuente solucionar el flujo de líquidos por gravedad a través de la planta de proceso. Actualmente, son conducidos a través de extensas redes de tuberías con muchas válvulas, a través de intercambiadores de calor, filtros y otros equipos que provocan a menudo elevadas pérdidas de carga. Los caudales son con frecuencia elevados. En definitiva, las bombas son utilizadas en numerosas partes de la planta de proceso, por lo que disponer de la bomba adecuada en el sitio adecuado es cada vez más importante. En la resolución de las instalaciones de transporte de líquidos se han de afrontar las siguientes cuestiones:

- Instalación de la bomba
- Líneas de aspiración e impulsión
- Tipo y tamaño de bomba necesaria. La bomba se ha de seleccionar atendiendo a:
  - -caudal a transportar
  - -producto a manejar
  - -viscosidad
  - -densidad
  - -temperatura
  - -presión en el sistema
  - -solución higiénica de la bomba

Las bombas típicas de las industrias lácteas son las centrífugas, las bombas de anillo líquido y las bombas de desplazamiento positivo. Estos tres tipos tienen aplicaciones diferentes, aunque la bomba centrífuga es el tipo más ampliamente utilizado en las industrias lácteas.

La bomba centrífuga, que se muestra en las Figuras 6.7.1 y 6.7.2 es principalmente utilizada para productos de baja viscosidad, pero no pueden manejar líquidos fuertemente aireados. La bomba de anillo líquido se utiliza cuando se precisa un tratamiento suave y con productos de viscosidad elevada.

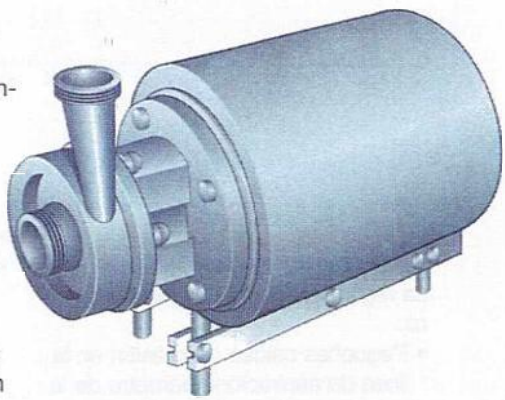


Fig. 6.7.1 *El tipo más común de bomba sanitaria en la industria láctea es la bomba centrífuga.*

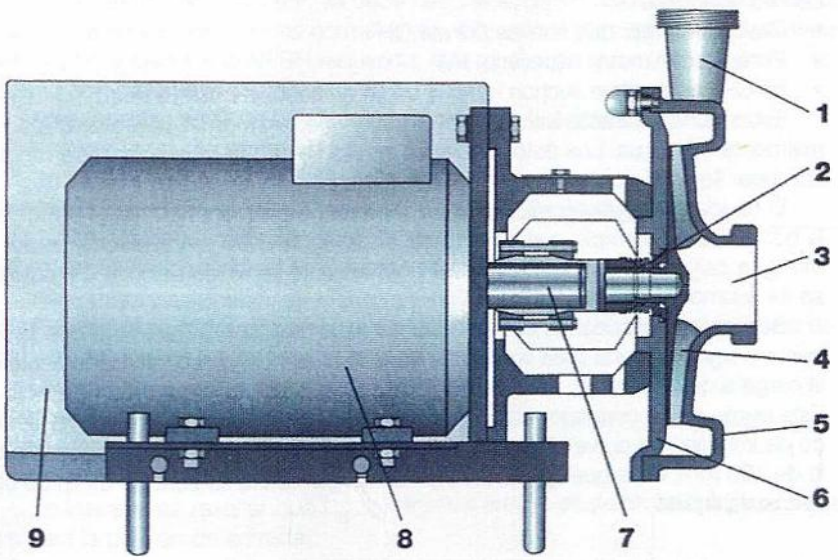


Fig. 6.7.2 *Partes principales de una bomba centrífuga.*
1. Línea de impulsión
2. Cierre axial
3. Línea de aspiración
4. Rodete
5. Carcasa de la bomba
6. Placa soporte
7. Eje motor
8. Motor (transmisión)
9. Cubierta de acero inoxidable y aislamiento sonoro.

Línea de aspiración

Antes de discutir las bombas, es importante comprender los fenómenos y problemas relacionados con el bombeo.

La bomba se ha de instalar tan cerca como sea posible del tanque o de la fuente desde donde se bombeará el líquido, reduciendo al mínimo los codos y las válvulas en el tramo o línea de aspiración. Este tramo ha de tener un diámetro amplio con el fin de reducir el riesgo de cavitación.

Línea de impulsión

En el tramo o línea de impulsión se ha de colocar alguna válvula de estrangulamiento, preferiblemente junto a una válvula antirretorno. La válvula de estrangulamiento se utiliza para regular el caudal de la bomba. La válvula antirretorno protege a la bomba de golpes de líquido y evita que el líquido retroceda cuando la bomba se para. El punto normal de instalación de la válvula de estrangulamiento está entre la bomba y la válvula antirretorno.

Cavitación

La cavitación se detecta por un sonido de golpeteo en la bomba. Este fenómero ocurre cuando la presión en el interior de la bomba cae localmente por debajo de la presión de vapor y se forman por ello pequeñas burbujas de vapor en el líquido. Pero la presión aumenta conforme el líquido es impulsado por el rotor, produciéndose condensaciones muy rápidas de los vapores. Las burbujas de vapor se rompen a velocidad muy alta y a la presión local que puede ser tan alta como de 100.000 bar. Esto se repite con una frecuencia muy elevada, y puede causar como una especie de picoteado en el material que lo rodea sobre todo si es quebradizo.

La cavitación tiene lugar cuando la presión en el tramo de aspiración es demasiado baja con relación a la presión de vapor del líquido que se bombea. La tendencia a la cavitación aumenta cuando los líquidos que se bombean son viscosos o volátiles.

La cavitación en las bombas da lugar a una carga reducida y a una baja eficiencia. Conforme aumenta la cavitación, la bomba deja de bombear progresivamente.

Se debe evitar la cavitación. Pero, si las condiciones de bombeo fueran muy difíciles y la bomba cavitase ligeramente, aún se podría utilizar la bomba, ya que las bombas de la industria láctea tienen impulsores o rodetes de acero resistente a la corrosión y al desgaste causado por la cavitación. Sin embargo, el rodete se puede dañar si la bomba se tiene funcionando en estas condiciones durante mucho tiempo.

Mediante cálculos se puede predecir la posibilidad de que ocurra cavitación en una bomba. Esto se analiza en el apartado NPSH.

Cómo evitar la cavitación

La regla general de manejo a cumplir es:

- Pequeñas caidas de presión en la linea de aspiración (diámetro de la tubería amplio, tubería de aspiración corta, pocas válvulas, pocos codos, etc.)
- Elevada presión de entrada en la bomba, por ejemplo manteniendo un nivel alto de líquido por encima del eje de la bomba
- Temperatura del líquido baja

Curvas características

Las curvas características son de indudable ayuda en la selección de una bomba para una aplicación determinada. Se necesitan tres curvas para seleccionar la bomba adecuada.

- Caudal y carga, que son las curvas QH
- Potencia del motor necesario, kW
- NPSH (net positive suction head = carga de succión positiva neta)

Estas curvas características se construyen mediante pruebas realizadas normalmente con agua. Los datos de estas curvas se deben recalcular si se van a bombear líquidos con otras propiedades físicas.

El caudal a desarrollar, Q, se ha de conocer normalmente antes de seleccionar la bomba. En el ejemplo que se muestra en la Figura 6.7.4 el caudal, Q, es de 15 m^3/h. La carga necesaria a desarrollar normalmente se ha de calcular. En este caso se asume una carga de 30 m.

Se localiza el caudal en el eje horizontal de la gráfica (Q). Partiendo desde este punto y siguiendo una línea vertical se corta la línea horizontal correspondiente con la carga a desarrollar, 30 m, que se localiza en el eje vertical de ordenadas (H). Este punto no se corresponde con ninguna curva QH para un diámetro determinado de impeller. La curva de tamaño de impeller mayor más cercana, en este caso la de 160 mm, es la que se debe elegir. La carga resultante será de 31 m de columna de líquido.

El paso siguiente consiste en bajar por la línea vertical de 15 m³/h hasta cortar la curva de potencia correspondiente al diámetro de impeller de 160 mm. Trazando una línea recta horizontal hacia la izquierda de esta intersección se encuentra un consumo de potencia de 2.3 kW. A esta cifra se le ha de añadir un margen de seguridad de un 15%, obteniéndose en este caso un total de aproximadamente 2.6 kW. Se puede utilizar un motor de 3 kW.

Si la bomba se acopla a un motor de un determinado tamaño, siempre hay que procurar que el motor no esté sobrecargado. Siempre se ha de prever un margen de seguridad para afrontar un exceso de carga.

Finalmente, la línea vertical correspondiente a los 15 m³/h se prolonga hasta encontar la curva de NPSH, situada a la derecha de la gráfica superior. Siguiendo una línea horizontal hasta la derecha, se obtiene que el valor de NPSH requerido es de 1 m.

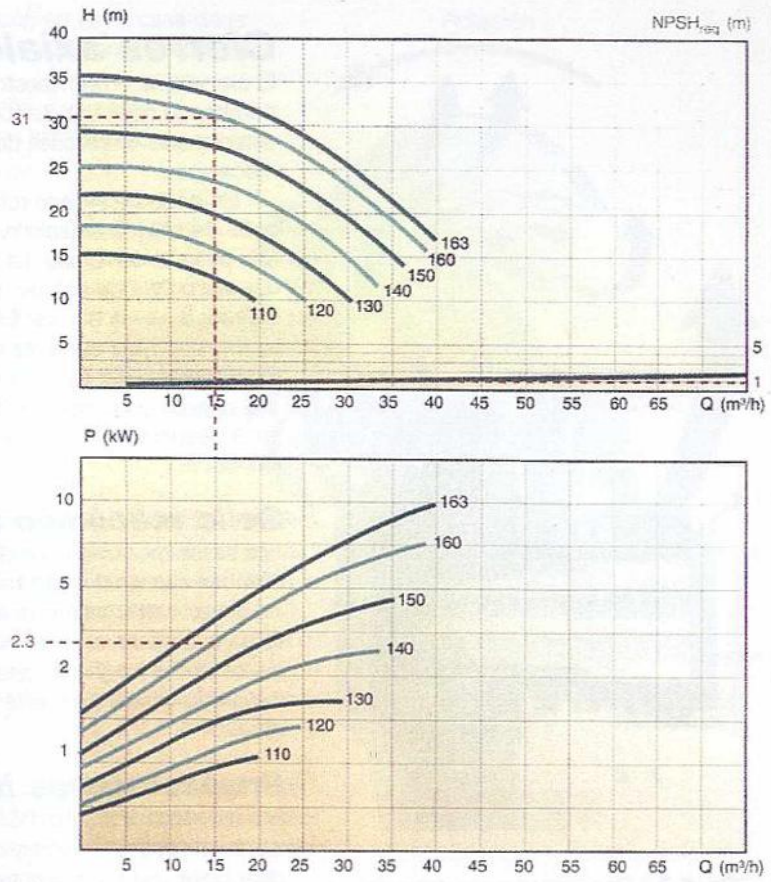


Fig. 6.7.3 *Curvas características de una bomba centrífuga.*

Carga (presión)

Cuando se selecciona una bomba se debe tener en cuenta que la carga, H, en la gráfica de las curvas características, es la carga de la bomba cuando el líquido fluye en el interior de la bomba sin altura de succión o presión de entrada.

Para obtener la presión real a la salida de la bomba es necesario considerar las condiciones del tramo de aspiración de la bomba. Si se tiene un vacío en la aspiración, la bomba ha de invertir parte del trabajo en llevar el líquido a una presión positiva. La presión a la salida será entonces más baja que la dada en las curvas características de la bomba.

Por otro lado, si el tramo de aspiración está inundado para conseguir una presión positiva en la entrada de la bomba, la presión de salida será más alta que la que se obtiene en las curvas características.

NPSH (Net Positive Suction Head)(Carga de Succión Positiva Neta)

Tal como se ha indicado anteriormente, en el proyecto de la instalación de una bomba es importante que el tramo de aspiración se disponga de manera que la bomba no cavite. En la Figura 6.7.3 se incluye una curva NPSH característica. La NPSH de una bomba es el exceso necesario de presión por encima de la presión de vapor del líquido necesario para evitar la cavitación. Este exceso se denomina $NPSH_{req}$.

Antes de utilizar este valor, se debe calcular la NPSH disponible de la línea de aspiración en las condiciones normales de utilización. Esta cifra, de $NPSH_{dis}$, debe ser igual o superior a la NPSH requerida, que es el valor que se encuentra en las curvas características.

Para calcular la $NPSH_{dis}$ en el sistema se utiliza la siguiente fórmula:

donde:

p_a = presión absoluta, en bar, en la superficie del líquido
p_v = presión de vapor absoluta, en bar
d_r = densidad relativa
h_s = altura de succión, en metros de columna de líquido
h_{fs} = pérdidas de carga en el tramo de aspiración, en metros de columna de líquido

$$NPSH_{dis} = h_s - h_{fs} + \frac{p_a}{d_r} \times 10 - \frac{p_v}{d_r} \times 10 \text{ m columna de líquido}$$

Es interesante resaltar que h_s es negativa para la altura de aspiración y positiva para la presión de entrada.

Cierres axiales o prensaestopas

El cierre axial o prensaestopas a menudo es el componente más sensible de una bomba, ya que está dispuesto entre una parte rotatoria -impeller o eje- y una parte estacionaria -la carcasa de la bomba. Normalmente se utiliza un prensaestopas mecánico.

Un anillo de sellado rotatorio tiene un superficie de sellado que gira frente a un anillo de sellado estacionario. Entre las caras de las superficies de sellado se forma una película de líquido. La película lubrica el sello y evita el contacto directo entre los dos anillos de sellado. Esto implica un desgaste mínimo y una larga vidal útil del sellado. Si la bomba funciona en seco, la película de líquido lubricante en el sello se destruye y aumenta el desgaste en los anillos de sellado.

El sello mecánico está normalmente equilibrado. Esto significa que es sensible a la presión en la bomba. El sello mecánico sanitario no necesita ajustes y no provoca desgaste del eje. El prensaestopas se presenta en las versiones simple e inundada.

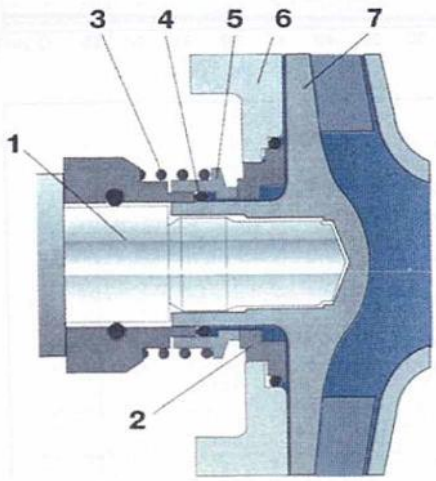


Fig. 6.7.4 *Prensaestopas mecánico simple.*
1. Eje
2. Anillo estacionario
3. Muelle
4. Anillo tórico
5. Anillo rotatorio
6. Plato soporte
7. Rodete o impulsor

Sello mecánico simple

Los sellos mecánicos simples (Figura 6.7.4) son estándar en la mayoría de las bombas sanitarias de la industria láctea.

En un sello mecánico, el anillo de sellado estacionario está unido al plato trasero de la carcasa de la bomba. El anillo rotatorio puede estar instalado fuera o dentro de la bomba y está sellado con un anillo tórico. El anillo rotatorio se puede mover a lo largo del eje y está prensado contra el anillo estacionario mediante un muelle.

Prensaestopas inundado

El sello inundado (Figura 6.7.5) consta de dos sellos. Se circula agua o vapor a través del espacio existente entre los dos sellos para enfriar o limpiar los sellos o para crear una barrera entre el producto y la atmósfera.

El prensaestopas inundado se recomienda en las siguientes aplicaciones:

- Con barrera de vapor para el bombeo de productos esterilizados, cuando se debe evitar la reinfección.
- Con inundación de agua de enfriamiento para el bombeo de soluciones muy espesas o productos que cristalizan, como las soluciones de azúcar.
- Con agua de enfriamiento del sello cuando se puede depositar material en el eje, en el sello, y quemarse encima debido a las altas temperaturas en la superficie del sello. Un ejemplo es la bomba de los pasteurizadores.
- Con barrera de agua para excluir el aire cuando se bombea el producto desde una presión de aspiración muy baja, como por ejemplo desde tanques a vacío.

La presión de la barrera de vapor no ha de exceder la presión atmosférica a 100ºC, ya que el vapor puede estar seco. Esto podría dar lugar a que se secase el sello y se deteriorasen las superficies de sellado. El vapor y el agua que se suministra se regula a la entrada al sello, y no deben haber obstrucciones en la tubería de salida. La barrera está siempre asegurada por el suministro desde la conexión más baja.

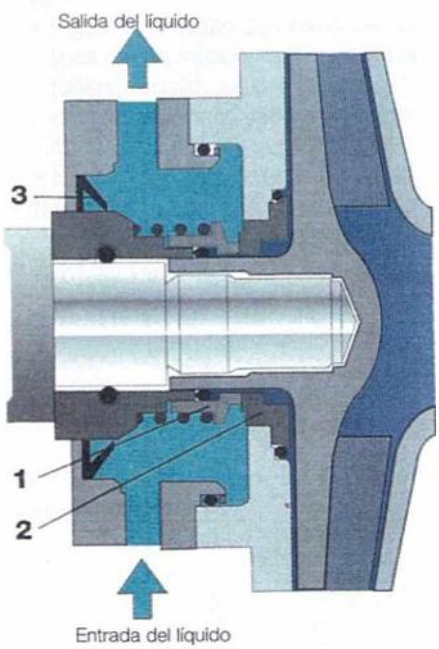


Fig. 6.7.5 *Prensaestopas inundado*
1. Anillo estacionario
2. Anillo rotatorio
3. Cierre de pico.

Material para el prensaestopas

Una combinación usual de materiales es el carbón para el anillo de sellado rotatorio y acero inoxidable para el anillo estacionario. Una combinación mejor es el carburo de silicona frente a carbón. Para líquidos abrasivos, se recomiendan los sellos con caras muy duras. El carburo de silicona frente a carburo de silicona se utiliza normalmente en estas aplicaciones.

Bombas centrífugas

Principios de bombeo

El líquido que entra en la bomba se dirige al centro (ojo) del impulsor y allí se le comunica un movimiento circular por parte de las aspas, tal como se indica en la Figura 6.7.6. Como resultado de la fuerza centrífuga y el movimiento del impulsor el líquido lo deja a una presión más alta y velocidad mayor que la que tenía en el

ojo. La velocidad es parcialmente convertida en presión en la carcasa de la bomba antes de que el líquido deje la bomba a través de la conexión de salida.

Las aspas del impulsor forman canales en la bomba. Las aspas están normalmente curvadas hacia atrás, pero pueden ser rectas en las bombas pequeñas.

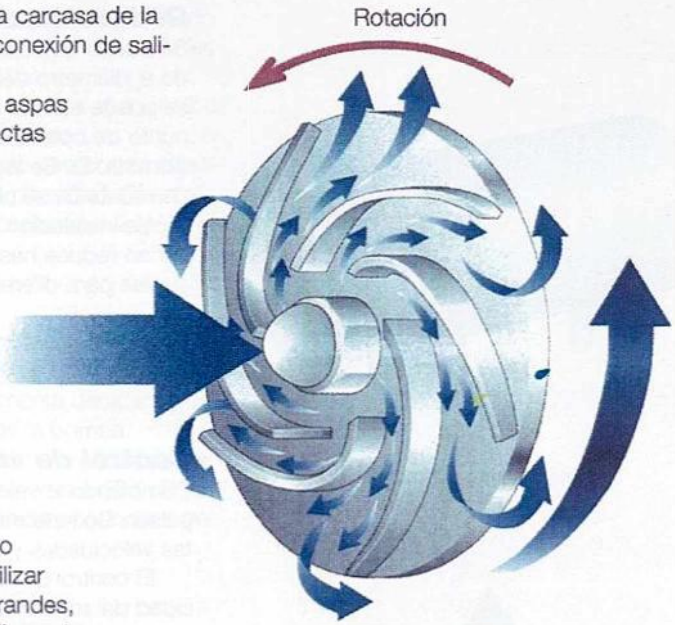


Fig. 6.7.6 *Principio de flujo en una bomba centrífuga.*

Aplicaciones de las bombas centrífugas

La bomba centrífuga es el tipo de bomba más utilizado en la industria láctea y es la que se debe utilizar si la aplicación concreta lo requiere. La razón de esto es que la bomba centrífuga normalmente es la más barata en cuanto a compra, operación y mantenimiento, y es también la bomba más adaptable a diferentes condiciones de operación.

La bomba centrífuga se puede utilizar en el bombeo de todo tipo de líquidos de relativamente baja viscosidad, que no requieren un tratamiento particularmente suave. Se puede utilizar también en líquidos que contienen partículas relativamente grandes, siempre que estas partículas no sean más grandes que las dimensiones del canal del impulsor.

Una desventaja de la bomba centrífuga es que no puede bombear líquidos aireados. Deja de estar cebada y se para el bombeo. Entonces, debe pararse la bomba y cebarse -llenarse con líquido- y ponerla en marcha de nuevo para volver a bombear. Por consiguiente, la bomba centrífuga no es autocebante, por lo que el tramo de aspiración y la carcasa de la bomba han de estar llenos de líquido antes de que pueda funcionar correctamente. De este modo, la instalación ha de ser proyectada cuidadosamente.

Control de caudal

Normalmente, es muy raro que se pueda seleccionar una bomba estándar que se ajuste exactamente a la capacidad requerida. Por esto se ha de hacer algún tipo de adaptación de la bomba a la capacidad real de trabajo. Esto se puede hacer:

- mediante estrangulamiento -muy flexible, pero no económica
- reduciendo el diámetro del impeller -menos flexible pero más económica
- controlando la velocidad - flexible y económica.

Las tres alternativas se ilustran en la Figura 6.7.7.

Estrangulamiento

El procedimiento más simple de control de caudal es ajustarlo mediante una válvula de estrangulamiento instalada en la línea de salida de la bomba. De esta manera es posible ajustar la bomba exactamente a la presión requerida y al caudal deseado. Este es el método correcto si la bomba se utiliza para distintas presiones y

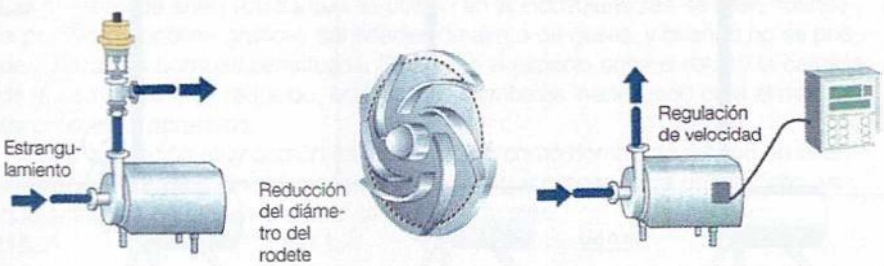


Fig. 6.7.7 *Métodos de control de caudal de una bomba centrífuga.*

caudales. El inconveniente es que el estrangulamiento es antieconómico cuando la presión y el caudal son constantes.

El estrangulamiento se puede llevar a cabo con discos perforados insertados en la tubería, con válvulas de control manuales o automáticas o con controladores de caudal mecánicos, que se instalan normalmente en las líneas de tratamiento de la leche.

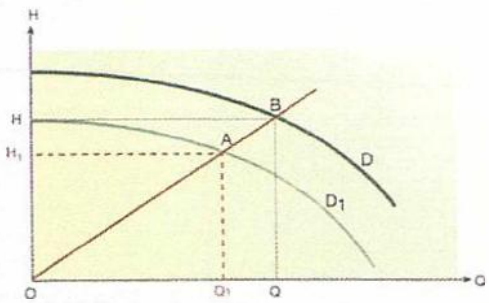


Fig. 6.7.8 *Reducción de caudal cuando se reduce el diámetro del rodete desde D a D1.*

Cierres axiales o prensaestopas

El cierre axial o prensaestopas a menudo es el componente más sensible de una bomba, ya que está dispuesto entre una parte rotatoria -impeller o eje- y una parte estacionaria -la carcasa de la bomba. Normalmente se utiliza un prensaestopas mecánico.

Un anillo de sellado rotatorio tiene un superficie de sellado que gira frente a un anillo de sellado estacionario. Entre las caras de las superficies de sellado se forma una película de líquido. La película lubrica el sello y evita el contacto directo entre los dos anillos de sellado. Esto implica un desgaste mínimo y una larga vidal útil del sellado. Si la bomba funciona en seco, la película de líquido lubricante en el sello se destruye y aumenta el desgaste en los anillos de sellado.

El sello mecánico está normalmente equilibrado. Esto significa que es sensible a la presión en la bomba. El sello mecánico sanitario no necesita ajustes y no provoca desgaste del eje. El prensaestopas se presenta en las versiones simple e inundada.

Sello mecánico simple

Los sellos mecánicos simples (Figura 6.7.4) son estándar en la mayoría de las bombas sanitarias de la industria láctea.

En un sello mecánico, el anillo de sellado estacionario está unido al plato trasero de la carcasa de la bomba. El anillo rotatorio puede estar instalado fuera o dentro de la bomba y está sellado con un anillo tórico. El anillo rotatorio se puede mover a lo largo del eje y está prensado contra el anillo estacionario mediante un muelle.

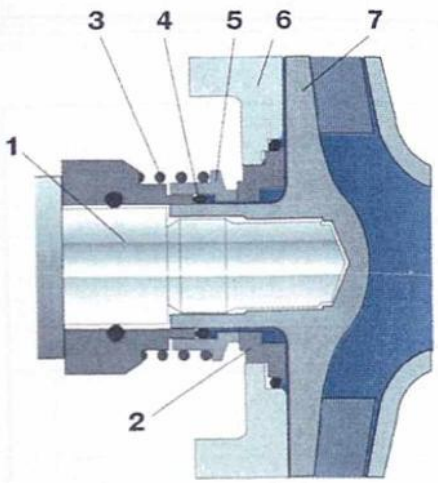


Fig. 6.7.4 *Prensaestopas mecánico simple.*
1. Eje
2. Anillo estacionario
3. Muelle
4. Anillo tórico
5. Anillo rotatorio
6. Plato soporte
7. Rodete o impulsor

Prensaestopas inundado

El sello inundado (Figura 6.7.5) consta de dos sellos. Se circula agua o vapor a través del espacio existente entre los dos sellos para enfriar o limpiar los sellos o para crear una barrera entre el producto y la atmósfera.

El prensaestopas inundado se recomienda en las siguientes aplicaciones:

- Con barrera de vapor para el bombeo de productos esterilizados, cuando se debe evitar la reinfección.
- Con inundación de agua de enfriamiento para el bombeo de soluciones muy espesas o productos que cristalizan, como las soluciones de azúcar.
- Con agua de enfriamiento del sello cuando se puede depositar material en el eje, en el sello, y quemarse encima debido a las altas temperaturas en la superficie del sello. Un ejemplo es la bomba de los pasteurizadores.
- Con barrera de agua para excluir el aire cuando se bombea el producto desde una presión de aspiración muy baja, como por ejemplo desde tanques a vacío.

La presión de la barrera de vapor no ha de exceder la presión atmosférica a 100ºC, ya que el vapor puede estar seco. Esto podría dar lugar a que se secase el sello y se deteriorasen las superficies de sellado. El vapor y el agua que se suministra se regula a la entrada al sello, y no deben haber obstrucciones en la tubería de salida. La barrera está siempre asegurada por el suministro desde la conexión más baja.

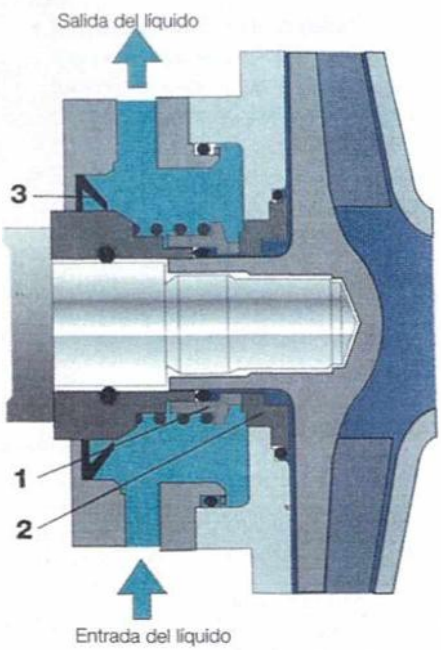


Fig. 6.7.5 *Prensaestopas inundado*
1. Anillo estacionario
2. Anillo rotatorio
3. Cierre de pico.

Material para el prensaestopas

Una combinación usual de materiales es el carbón para el anillo de sellado rotatorio y acero inoxidable para el anillo estacionario. Una combinación mejor es el carburo de silicona frente a carbón. Para líquidos abrasivos, se recomiendan los sellos con caras muy duras. El carburo de silicona frente a carburo de silicona se utiliza normalmente en estas aplicaciones.

Bombas centrífugas

Principios de bombeo

El líquido que entra en la bomba se dirige al centro (ojo) del impulsor y allí se le comunica un movimiento circular por parte de las aspas, tal como se indica en la Figura 6.7.6. Como resultado de la fuerza centrífuga y el movimiento del impulsor el líquido lo deja a una presión más alta y velocidad mayor que la que tenía en el

ojo. La velocidad es parcialmente convertida en presión en la carcasa de la bomba antes de que el líquido deje la bomba a través de la conexión de salida.

Las aspas del impulsor forman canales en la bomba. Las aspas están normalmente curvadas hacia atrás, pero pueden ser rectas en las bombas pequeñas.

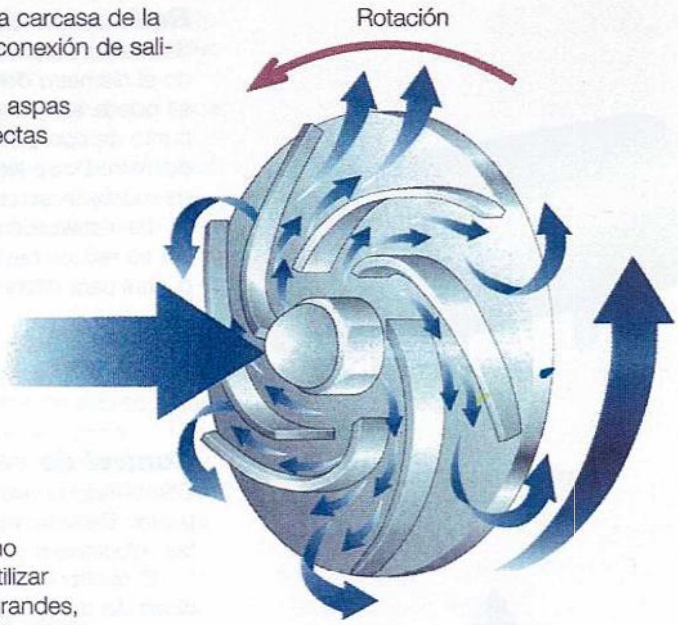


Fig. 6.7.6 *Principio de flujo en una bomba centrífuga.*

Aplicaciones de las bombas centrífugas

La bomba centrífuga es el tipo de bomba más utilizado en la industria láctea y es la que se debe utilizar si la aplicación concreta lo requiere. La razón de esto es que la bomba centrífuga normalmente es la más barata en cuanto a compra, operación y mantenimiento, y es también la bomba más adaptable a diferentes condiciones de operación.

La bomba centrífuga se puede utilizar en el bombeo de todo tipo de líquidos de relativamente baja viscosidad, que no requieren un tratamiento particularmente suave. Se puede utilizar también en líquidos que contienen partículas relativamente grandes, siempre que estas partículas no sean más grandes que las dimensiones del canal del impulsor.

Una desventaja de la bomba centrífuga es que no puede bombear líquidos aireados. Deja de estar cebada y se para el bombeo. Entonces, debe pararse la bomba y cebarse -llenarse con líquido- y ponerla en marcha de nuevo para volver a bombear. Por consiguiente, la bomba centrífuga no es autocebante, por lo que el tramo de aspiración y la carcasa de la bomba han de estar llenos de líquido antes de que pueda funcionar correctamente. De este modo, la instalación ha de ser proyectada cuidadosamente.

Control de caudal

Normalmente, es muy raro que se pueda seleccionar una bomba estándar que se ajuste exactamente a la capacidad requerida. Por esto se ha de hacer algún tipo de adaptación de la bomba a la capacidad real de trabajo. Esto se puede hacer:

- mediante estrangulamiento -muy flexible, pero no económica
- reduciendo el diámetro del impeller -menos flexible pero más económica
- controlando la velocidad - flexible y económica.

Las tres alternativas se ilustran en la Figura 6.7.7.

Estrangulamiento

El procedimiento más simple de control de caudal es ajustarlo mediante una válvula de estrangulamiento instalada en la línea de salida de la bomba. De esta manera es posible ajustar la bomba exactamente a la presión requerida y al caudal deseado. Este es el método correcto si la bomba se utiliza para distintas presiones y

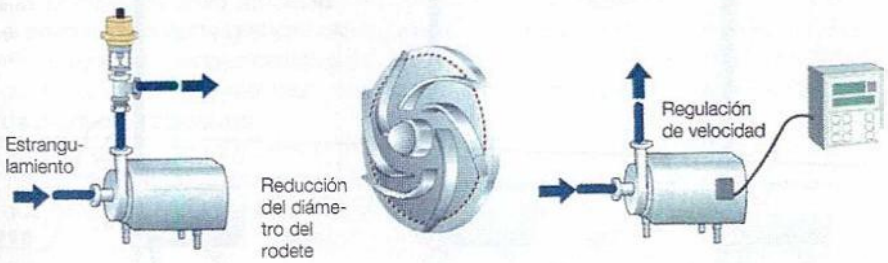


Fig. 6.7.7 *Métodos de control de caudal de una bomba centrífuga.*

caudales. El inconveniente es que el estrangulamiento es antieconómico cuando la presión y el caudal son constantes.

El estrangulamiento se puede llevar a cabo con discos perforados insertados en la tubería, con válvulas de control manuales o automáticas o con controladores de caudal mecánicos, que se instalan normalmente en las líneas de tratamiento de la leche.

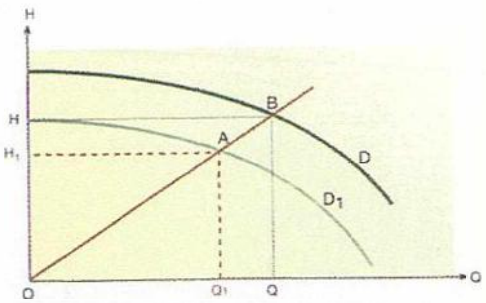


Fig. 6.7.8 *Reducción de caudal cuando se reduce el diámetro del rodete desde D a D1.*

Reducción del diámetro del rodete

Se puede obtener una curva de bombeo más baja que la curva máxima reduciendo el diámetro del rodete original D a D_1 (ver la Figura 6.7.8). El nuevo diámetro D_1 se puede estimar trazando una linea recta desde O de la gráfica pasando por el punto de operación deseado A hasta llegar a la curva estandar B del rodete de diámetro D. Se lee la presión H y la nueva presión requerida H_1. El nuevo diámetro de rodete D_1 se obtiene de la fórmula:

La instalación de bombeo más económica se obtiene si el diámetro del impulsor se reduce hasta el diámetro D_1. La mayoría de las curvas características tienen curvas para diferentes diámetros de rodete.

$$D_1 = D \times \sqrt{\frac{H_1}{H}}$$

Control de velocidad

Cambiando la velocidad se puede cambiar la fuerza centrífuga creada por el impulsor. De este modo, la presión y la capacidad también cambiarán -sube para altas velocidades y baja para bajas velocidades.

El control de velocidad es la forma más eficiente de regular la bomba. La velocidad del rodete es siempre exactamente la correcta para el adecuado funcionamiento de la bomba, y por lo tanto el consumo de potencia y el tratamiento del líquido.

Se puede utilizar un convertidor de frecuencia junto con los motores trifásicos estándar. Están disponibles para control manual o automático del caudal y de la presión.

Bombas para 60 Hz

La mayoría de las bombas centrífugas se diseñan para trabajar a 50 Hz, que implica trabajar a unas 3000 rpm (revoluciones por minuto) para un motor bifásico. En algunos paises, la potencia se suministra a 60 Hz, lo que significa que la velocidad se incrementa un 20% hasta las 3600 rpm. Las curvas características de la bomba para 60 Hz son suminstradas para cada bomba por los fabricantes de bombas.

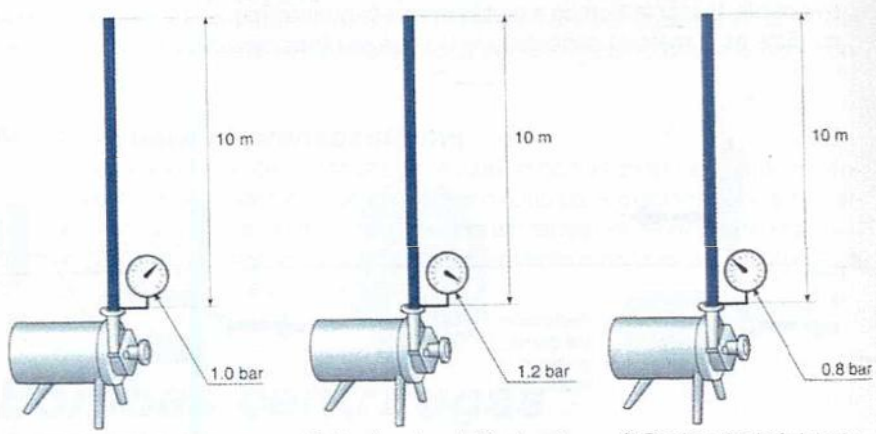
¡Nota! En las curvas características de las bombas, la carga está siempre en metros de columna de líquido y el consumo de potencia está referido al agua con densidad 1.0. Esto significa que para el bombeo de líquidos de mayor densidad, la potencia que da la curva se debe multiplicar por la densidad del líquido.

Carga y presión

Densidad

La carga en metros de columna de líquido es independiente de la densidad del líquido que va a ser bombeado. Sin embargo, la densidad es de una gran importancia para la presión de descarga y el consumo de potencia.

Si la bomba y la viscosidad del líquido son las mismas en los diferentes casos, la columna de líquido será llevada hasta la misma altura (10 metros en el ejemplo),



A. Bombeo de agua de densidad relativa = 1.0
10 m de col. de **líquido** =
10 m de col. de **agua** = 1.0 bar.

B. Bombeo de solución de azúcar de densidad relativa = 1.2
10 ml de col. de **líquido** =
12 m de col. de **agua** = 1.2 bar

C. Bombeo de alcohol de densidad relativa = 0.8
10 ml de col. de **líquido** =
8 m de col. de **agua.**

Fig. 6.7.9 *Comparación de columnas de líquido y agua para productos de diferentes densidades.*

sea cual sea la densidad. La carga de la bomba en metros de columna de líquido es la misma. Sin embargo, conforme la densidad -la masa del líquido- varía, la lectura de presión también variará (ver ejemplos en la Figura 6.7.9).

La presión de bombeo en metros de columna de agua se obtiene al multiplicar la presión en metros de columna de líquido por la densidad relativa.

La bomba tiene que trabajar más con el líquido más pesado que con el más ligero. La potencia requerida cambia proporcionalmente con la densidad. Si en el ejemplo A se necesita 1 kW, entonces en el ejemplo B se necesitarán 1.2 kW y en el ejemplo C se precisarán tan sólo 0.8 kW.

Viscosidad

Los líquidos de mayor viscosidad generan una mayor resistencia al flujo que los líquidos de baja viscosidad. Cuando se bombean los líquidos de mayor viscosidad, el caudal y la carga se reducen y la demanda de potencia aumenta debido a que aumenta la resistencia al flujo en el impulsor y en la carcasa de la bomba.

Las bombas centrífugas pueden manejar líquidos de viscosidad relativamente elevada, pero no se recomiendan para viscosidades muy superiores a 500 cP ya que la demanda de potencia aumenta de forma muy pronunciada por encima de este nivel.

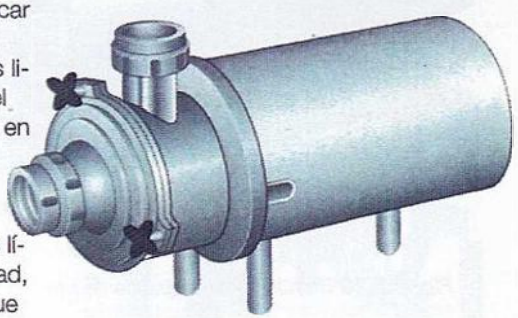


Fig. 6.7.10 *Bomba de anillo líquido.*

Bombas de anillo líquido

Las bombas de anillo líquido, (Figuras 6.7.10 y 6.7.11), son autocebantes si la carcasa se mantiene llena al menos hasta la mitad con líquido. De esta manera pueden manejar líquidos con un elevado contenido de aire o gases.

La bomba consta de un impeller o rotor con palas radiales rectas (4), que giran en la carcasa o cuerpo de la bomba, que también va provista de una entrada, una salida y un motor de accionamiento. Desde la entrada, el líquido es conducido hacia las palas, donde es acelerado hacia el cuerpo de la bomba, formando un anillo líquido cuya velocidad de rotación es esencialmente la misma que la del impeller.

Hay un canal en la pared del cuerpo de la bomba. Este canal es poco profundo en el punto 2, aumentando progresivamente su profundidad y anchura conforme se acerca al punto 3, volviendo a estrecharse nuevamente hasta alcanzar el punto 6. A la vez que el líquido es transportado por las aspas, el canal se llena de líquido, aumentando el volumen disponible entre las aspas. Esto produce un vacio en el centro, que hace que entre más líquido en dicho espacio procedente de la línea de succión.

Una vez que se ha pasado el punto 3, el volumen entre las aspas se ve reducido al hacerse el canal más estrecho. Esto fuerza gradualmente al líquido hacia el centro y aumenta gradualmente la presión, y el liquido es descargado a través del orificio 7 hacia la salida 5 de la bomba.

El aire en la linea de aspiración será bombeado de la misma forma que el líquido.

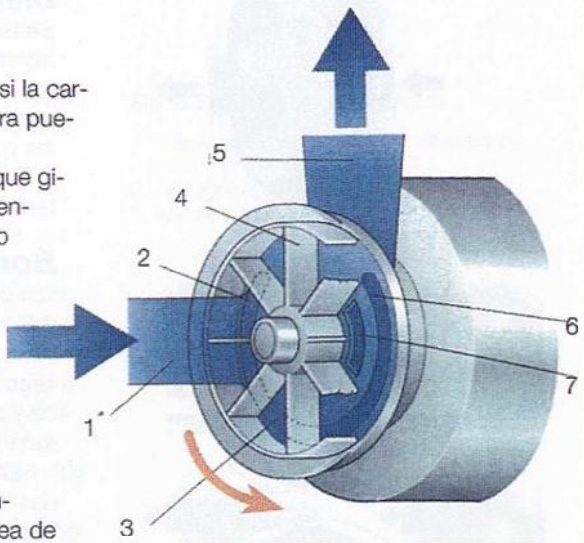


Fig. 6.7.11 *Principio de trabajo de una bomba de anillo líquido autocebante.*

1. Línea de aspiración
2. Canal poco profundo
3. Canal profundo
4. Aletas radiales
5. Salida de la bomba
6. Canal poco profundo
7. Puerta de descarga

Aplicaciones

Las bombas de anillo líquido que se utilizan en la industria láctea se usan cuando el producto contiene grandes cantidades de aire o de gases, y cuando no se pueden utilizar las bombas centrífugas. Dado que el espacio entre el rotor y la carcasa de la bomba es muy reducido, este tipo de bomba es inadecuado para el manejo de productos abrasivos.

Una aplicación muy común es su utilización como bomba de retorno en una instalación CIP para las soluciones de limpieza que procedan de un depósito, ya que entonces contienen grandes cantidades de aire.

Bombas de desplazamiento positivo

Principio de funcionamiento

Este grupo de bombas trabaja sobre el principio del desplazamiento positivo. Se dividen en dos grandes categorías: bombas rotativas y bombas alternativas. Cada categoría incluye varios tipos.

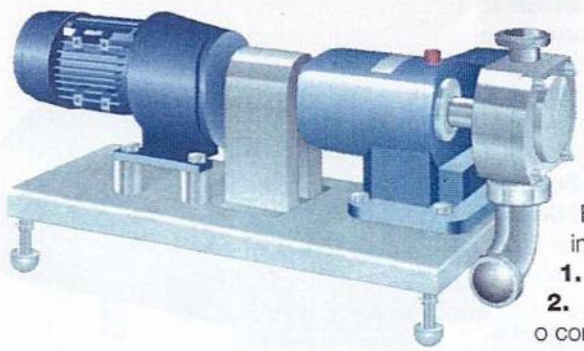


Fig. 6.7.12 *Bomba de desplazamiento positivo del tipo rotor lobulado con motoreductor acoplado en una misma bancada.*

El principio de una bomba de desplazamiento positivo es que por cada revolución o cada movimiento alternativo, se bombea una determinada cantidad de líquido, sea cual sea la carga manométrica, H.

Sin embargo, a viscosidades más bajas puede haber algún deslizamiento, fugas internas, conforme aumenta la presión. Esto reducirá el caudal desarrollado por revolución o embolada. El deslizamiento se reduce con el aumento de la viscosidad.

El estrangulamiento de la salida de una bomba de desplazamiento positivo incrementará la presión dramáticamente. Entonces será importante que:

1. no se tenga ninguna válvula cerrada tras la bomba
2. la bomba se instala con una válvula de alivio, colocada dentro de la bomba o como una válvula de by-pass.

Control de caudal

El caudal de una bomba de desplazamiento positivo se controla normalmente mediante la regulación de la velocidad. El ajuste del émbolo en las bombas alternativas es otra posibilidad.

Diámetro y longitud de la tubería

Se tiene que llevar cuidado en el dimensionado de la red de tuberías cuando se bombean productos de viscosidad elevada. Las bombas se deben entonces colocar cerca del tanque de alimentación del producto y el diámetro de la tubería de aspiración debe ser generoso. De otra forma, las pérdidas de presión serán tan altas que la bomba cavitará.

Lo mismo se puede decir del lado de salida de la bomba. La presión necesaria tendrá que ser muy alta si las tuberías son muy largas y estrechas.

Bombas de rotor lobulado

Las bombas de rotor lobulado (Figura 6.7.12) tienen dos rotores, normalmente con 2-3 lobulos cada uno. Se crea un vacío a la entrada cuando los rotores giran. Este vacío hace que entre el líquido al interior de la bomba. Entonces, se mueve a lo largo de la periferia del cuerpo de la bomba hacia la salida. Allí el volumen se reduce y el líquido se fuerza a salir por la boca de salida. Esta sucesión de pasos que sufre el líquido se muestra en la Figura 6.7.13.

Los rotores son accionados independientemente mediante transmisiones situadas detrás de la bomba. Los rotores no se tocan entre sí o con la carcasa de la bomba, pero la separación entre todas las partes de la bomba son muy estrechas.

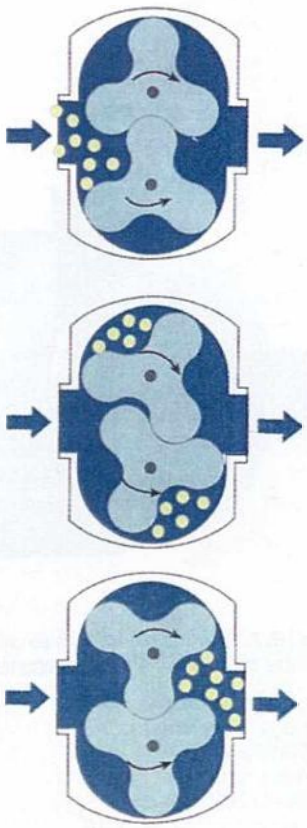


Fig. 6.7.13 *Principio de trabajo de la bomba de rotor lobulado.*

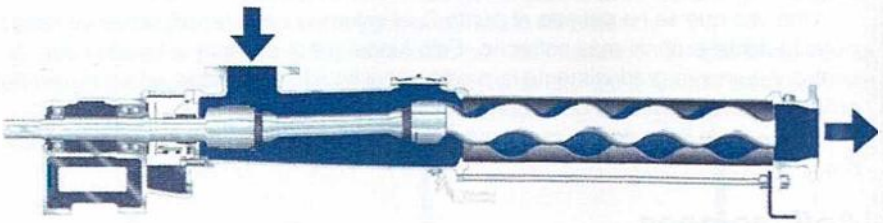


Fig. 6.7.14 *Bomba de tornillo excéntrico.*

Aplicaciones

Este tipo de bomba tiene un rendimiento volumétrico del 100% (no tiene fugas) cuando la viscosidad es superior a unos 300 cP. Debido al adecuado diseño higiénico y al tratamiento suave que se consigue en el producto, este tipo de bomba es ampliamente utilizado para el bombeo de natas con un contenido elevado de grasa, productos lácteos fermentados, mezclas cuajada/suero, etc.

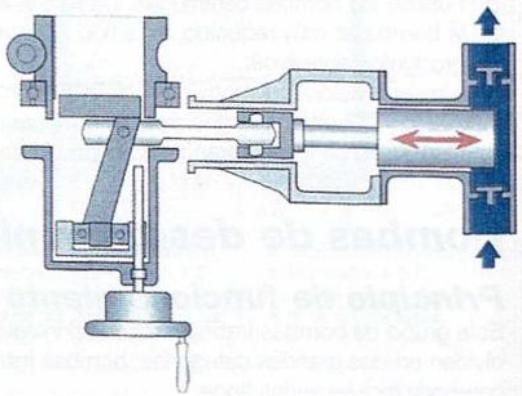


Fig. 6.7.15 *Bomba de pistón de recorrido ajustable.*

Bombas de tornillo excéntrico

Esta bomba se ajusta mejor a productos de viscosidad baja que la bomba de rotor lobulado. No es tan higiénica como la bomba de rotor lobulado, pero maneja suavemente el producto bombeado. El rango de aplicación es el mismo que el de la bomba de rotor lobulado.

La bomba de tornillo excéntrico (Figura 6.7.14) no puede funcionar en seco, ni siquiera durante pocos segundos, ya que se dañaría.

Bombas de pistón

Una bomba de pisón consta de un pistón que se mueve alternativamente dentro del cilindro (Figura 6.7.15). Las válvulas de entrada y salida controlan que el flujo tenga lugar en la dirección correcta.

Las bombas de pistones en las industrias lácteas se utilizan principalmente como bombas dosificadoras. Un homogeneizador también posee una bomba de pistones.

Bombas de diafragma

Las bombas de diafragma accionadas con aire comprimido (una de las cuales se muestra en la Figura 6.7.16) se utilizan en el tratamiento suave del producto. Se tienen pulsaciones en la presión de salida y la capacidad cambiará con el cambio de presión del producto, ya que la presión del aire permanece constante. Estas bombas son utilizadas principalmente para el transporte de productos, pero no durante el procesado.

Las bombas de diafragma accionadas mecánicamente se utilizan frecuentemente como bombas dosificadoras.

Principio de trabajo

Las bombas de diafragma son bombas de desplazamiento positivo de doble actuador con dos cámaras de bombeo alternativas. El aire comprimido que se requiere para el accionamiento de la unidad es admitido a través de una válvula de control por la parte posterior de cada diafragma cada vez. Este desplaza el producto de las cámaras de bombeo alternativas.

El diafragma tiene la función adicional de separar el producto bombeado del aire comprimido. Como prevalece la misma presión en ambos lados (aire comprimido y cámara de bombeo) durante cada embolada, el diafragma en sí mismo no está sometido a diferencias de presión. Esta es una de las razones de la larga vida del diafragma.

Cuando se retrae el diafragma se crea un vacío, y el producto bombeado fluye dentro de la cámara. El volumen en la cámara opuesta es al mismo tiempo reducido, y el producto se descarga a través de la válvula antirretorno de salida.

Los dos diafragmas están conectados a una biela de pistones común, por lo que siempre se tendrá aspiración en una de las cámaras mientras que el producto se descarga de la otra. El aire comprimido sirve dos propósitos durante cada fase: el proceso de descarga actual y la entrada de más producto a ser transportado.

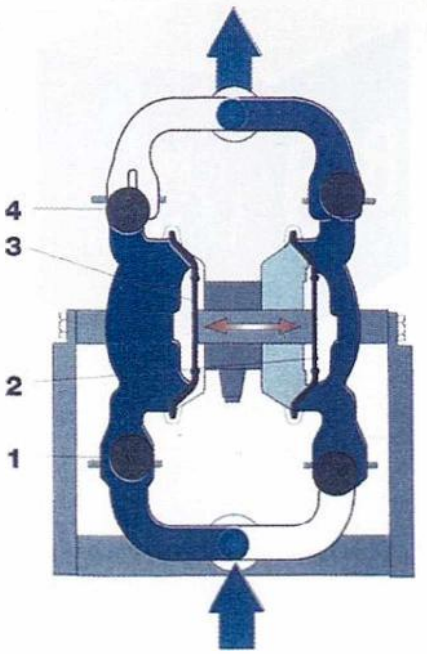


Fig. 6.7.16 *Bomba de diafragma.*

1. *Válvula de bola abierta durante la aspiración.*
2. *Diafragma de bombeo*
3. *Válvula de bola cerrada*

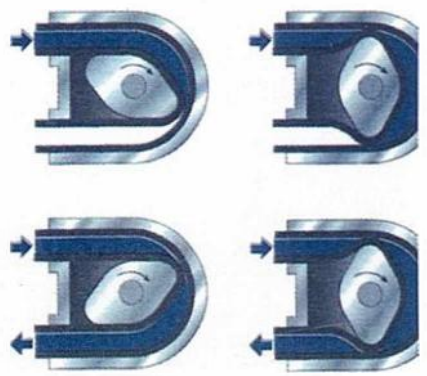


Fig. 6.7.17 *Secuencia de bombeo peristáltico.*

Bombas peristálticas

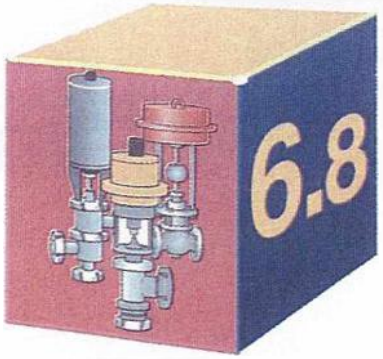
Este tipo de bomba (Figura 6.7.17) se puede utilizar para el transporte así como para la medida volumétrica precisa de productos.

El rotor gira en el interior de un alojamiento (dentro del cuerpo de la bomba) lleno de lubricante y comprime el tramo de tubo flexible del interior de la bomba mediante unos rodillos. Los lados de aspiración y descarga están herméticamente separados uno del otro.

Durante la rotación el líquido o gas que está dentro de este tubo flexible es transportado hasta la boca de salida más baja. Esto crea un vacío en el lado de aspiración, y el producto entra en la bomba. La bomba es autocebante y por lo tanto es apropiada para el vaciado de bidones con zumo concentrado y grasa láctea anhidra (GLA).

El volumen entre los rodillos es igual a la mitad del volumen transportado por rotación. Esta cantidad es constantemente bombeada hacia la boca de salida durante la rotación, mientras que la misma cantidad es absorbida en el tramo de aspiración.

Tuberías, válvulas y accesorios



La red de tuberías

La leche o un producto lácteo líquido fluye entre los distintos componentes de la planta de proceso gracias al sistema de tuberias.

En la industria láctea existen otras redes de tuberías para otros productos tales como agua, vapor, soluciones de limpieza, refrigerantes y aire comprimido. También se tiene normalmente una red de evacuación de aguas residuales. Todos estos sistemas de transporte de líquidos son básicamente diseñados de la misma forma. La diferencia radica en los materiales utilizados, el diseño de los componentes y los tamaños de las tuberias.

Todos los componentes en contacto con los productos lácteos que se transportan están construidos con acero inoxidable. En las demás redes de tuberías se utilizan otros materiales, como acero forjado, acero al carbono, cobre y aluminio. Se puede utilizar plástico en las líneas de agua y aire comprimido, y cerámica en las tuberías para los efluentes.

La sección que sigue a continuación trata únicamente de la línea de producto y sus componentes. El sistema de tuberías para fluidos de servicio se describe en la sección donde se habla de las instalaciones auxiliares.

En la red de tuberías de producto se incluyen los siguientes tipos de accesorios:

- Tramos rectos, codos, tes, reducciones y uniones.
- Accesorios especiales tales como mirillas, codos para instrumentos, etc.
- Válvulas para parada y direccionado del flujo de producto.
- Válvulas de control de presión y caudal.
- Soportes para las tuberias.

Por razones higiénicas, todas las partes en contacto con los productos lácteos de los equipos de proceso están fabricadas con acero inoxidable. Se utilizan dos tipos principalmente, el acero inoxidable AISI 304 y AISI 316. Este último es más resistente a la corrosión.

Estos tipos de acero inoxidable se corresponden con los tipos que se especifican a continuación en las normas suecas:

USA	AISI 304	AISI 316	AISI 316L
Suecia	SIS 2333	SIS 2343	SIS 2359

Conexiones

Las uniones permanentes deben ser soldadas (Figura 6.8.1). Pero cuando se desea poder desmontar las uniones éstas se han de resolver por medio de uniones desmontables con adecuado diseño higiénico (Figura 6.8.2), que constan de un extremo macho y una tuerca con una junta anular en el otro, o de una unión tipo clamp (abrazadera) con una junta anular.

Este tipo de unión permite la desconexión sin perturbar las otras secciones de tuberia. Este tipo de unión se utiliza para conectar equipos de proceso, instrumentos, etc., que necesitan ser desmontados para su limpieza, reparación o sustitución.

En los distintos paises se tienen diferentes normas que hacen referencia a las uniones de tuberías. Estas normas pueden ser SMS (normas suecas para la industria láctea), que se utilizan a nivel internacional, DIN (Alemania), BS (Británicas), IDF/ISO* y ISO (muy utilizadas en Estados Unidos).

Los codos, tes y los accesorios similares pueden ser soldados o bien ir provistos de uniones. En este último caso, el accesorio puede ser encargado con finales en tuerca y macho o con abrazaderas.

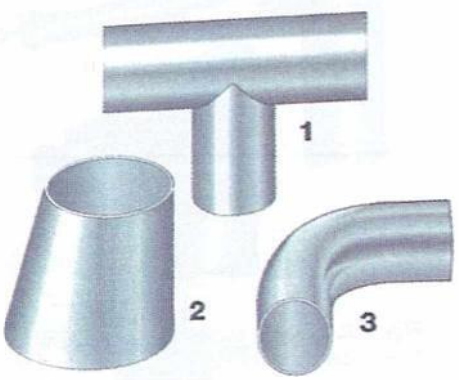


Fig. 6.8.1 *Algunos ejemplos de accesorios para uniones fijas de tuberías.*
1. Te
2. Reducción
3. Codo

*) IDF = Internacional Dairy Federation
ISO = Internacional Standarisation Organisation

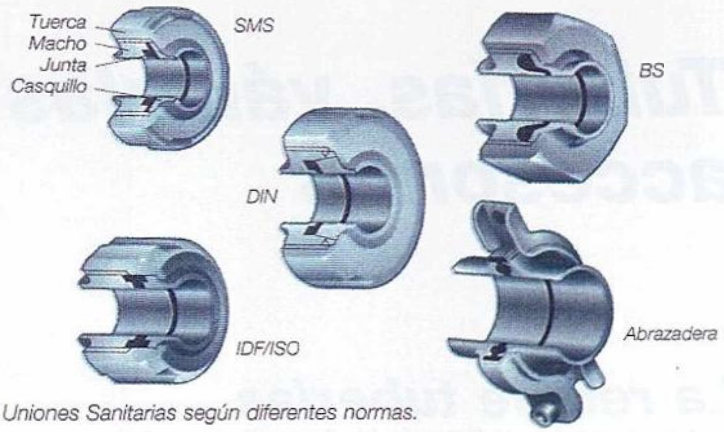


Fig. 6.8.2 *Uniones Sanitarias según diferentes normas.*

Todas las uniones deben ser apretadas firmemente para evitar fugas de leche o bien que entre aire en el sistema, causando problemas en etapas posteriores de tratamiento.

Accesorios especiales para las tuberías

Las mirillas se colocan en la línea con objeto de tener acceso visual al producto que se está tratando.

Se utilizan codos para la conexión de instrumentos de medida como termómetros y manómetros. El sensor debe estar colocado en la tubería contra la corriente, haciendo que la lectura sea lo más precisa posible. La conexión puede ser utilizada también para colocar un grifo tomamuestras. La conexión para instrumentos también se puede resolver mediante soldadura directa a la tubería cuando ésta se está instalando.

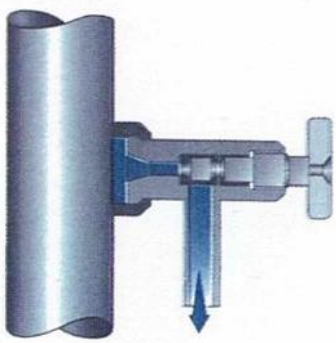


Fig. 6.8.3 *Válvula de muestreo.*

Dispositivos para la toma de muestras

Los dispositivos de toma de muestras se han de instalar en puntos estratégicos de la planta para tomar muestras de producto para su análisis. Para el control de calidad, tal como la determinación del contenido en grasa de la leche y del valor del pH de los productos acidificados, las muestras pueden ser recogidas mediante un grifo tomamuestras (Figura 6.8.3).

Cuando se trata de tests para controlar la calidad higiénica, el método de toma de muestras debe ser tal que se evite cualquier riesgo de contaminación exterior a la tubería. En este caso se utiliza un apéndice especial para la toma de muestras, como se ve en la Figura 6.8.4. Este apéndice tiene una junta de goma que se puede atravesar con una jeringa de toma de muestras. Antes de esta toma de muestras, primero se separan todas las partes de este apédice de la tubería y se esterilizan (normalmente se humedecen con una solución clorada justo antes de la toma de muestras) para que no contaminen la muestra, procediendo inmediatamente después a tomar muestras con una aguja hipodérmica de una jeringuilla que atravesará la junta de goma del apéndice.

Para productos asépticos (que han sido tratados a temperaturas altas y son estériles) las muestras deben ser tomadas siempre a través de una válvula tomamuestras de tipo aséptico, con objeto de evitar reinfecciones en el producto.

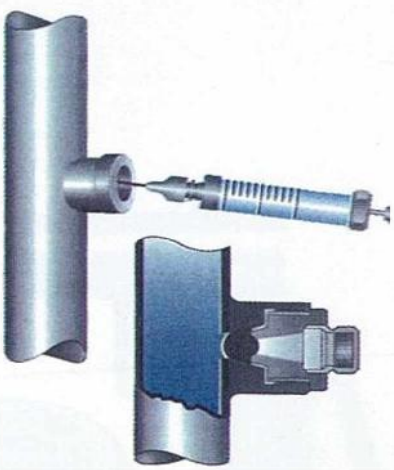


Fig. 6.8.4 *Dispositivo de muestreo para análisis bacteriológicos.*

Válvulas

Sistemas de cierre estanco

Hay muchos puntos de desviación en una red de tuberías donde el producto podría pasar de una tubería a otra, pero que muchas veces estos puntos han de estar cerrados de forma estanca para evitar que se mezclen diferentes productos que circulen por esas líneas distintas. Cuando las lineas se aislan unas de otras, no debe producirse ninguna fuga, por ejemplo de solución de limpieza, que pudiera mezclarse con producto en proceso, como leche por ejemplo.

Este es un problema común que se plantea en la ingeniería de diseño de una planta para el procesado de productos lácteos. Los productos lácteos y las soluciones de limpieza circulan por lineas separadas, y se ha de mantener esa separación. La Figura 6.8.5 muestra cuatro posibles soluciones para realizar la misma función.

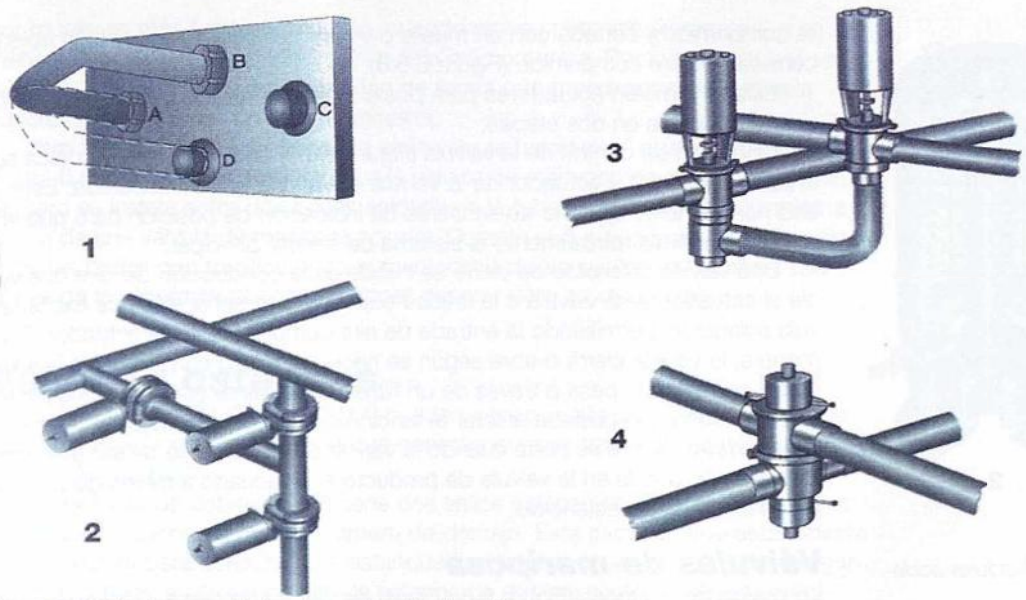


Fig. 6.8.5 *Soluciones sanitarias de cambio de dirección.*
1 Codo desplazable para cambio manual entre diferentes líneas
2 Tres válvulas de cierre pueden desarrollar la misma función
3 Una válvula de cierre y una válvula de cambio de dirección pueden realizar la misma tarea
4 Una válvula de varias vías es suficiente para cerrar de forma estanca y desviar el flujo

Válvulas de cierre y válvulas de desviación de flujo

En la red de tuberías existen muchos puntos donde debe ser posible detener el flujo o bien dirigirlo hacia otra dirección. Estas funciones son realizadas por válvulas.

Las válvulas de asiento, accionadas manual o automáticamente, o las válvulas de mariposa, son las que se utilizan en estos casos.

Válvulas de asiento

El cuerpo de la válvula tiene un asiento que recibe al obturador que se situa al final del vástago de dicha válvula, que se mueve subiendo o bajando sobre el asiento bajo la acción de una manivela o de un actuador neumático (Figura 6.8.6).

La válvula de asiento se fabrica también en una versión para desviación del flujo hacia otra línea o dirección. Esta válvula tiene tres o cinco vías de entrada/salida (Figura 6.8.7). Cuando se mueve el vástago y baja el obturador el líquido fluirá desde la entrada 2 a la salida 1, y cuando el obturador sube hasta encontar el asiento superior, el flujo es dirigido a través de la salida 3, tal como se indica en los dibujos esquemáticos de la Figura 6.8.7.

Este tipo de válvulas puede tener hasta cinco vias. El número viene determinado por las necesidades de proceso.

Para el accionamiento de estas válvulas se dispone de distintos actuadores controlados a distancia. Por ejemplo, la válvula puede ser abierta por medio de ai-

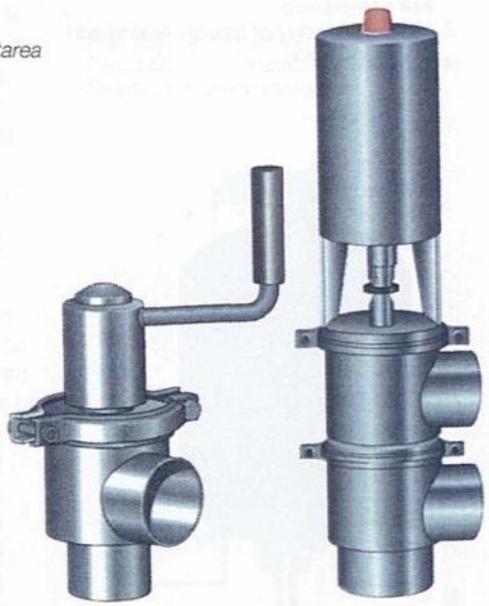


Fig. 6.8.6 *Válvula de asiento, de cierre manual, y válvula de varias vias, accionada neumáticamente. El mecanismo de accionamiento es intercambiable entre las válvulas de asiento, las de cierre y las de varias vías.*

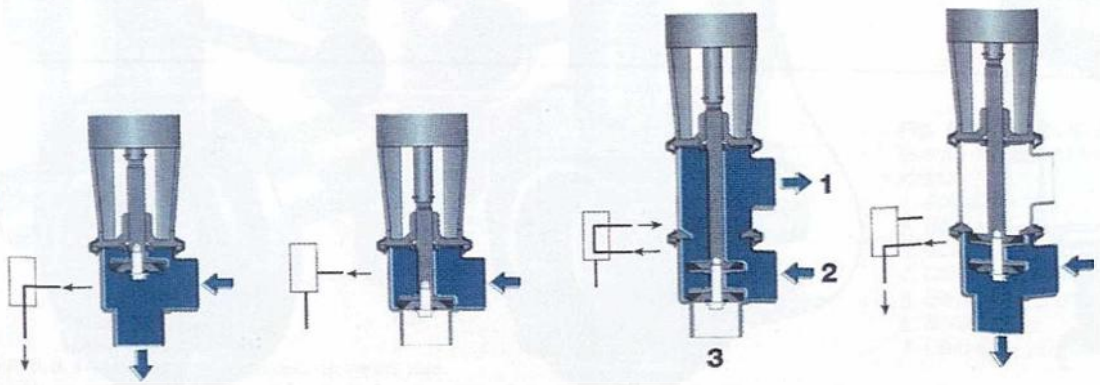


Fig. 6.8.7 *Válvula de cierre y de varias vías con el obturador en distintas posiciones, junto a los correspondientes símbolos de diagrama de flujo.*

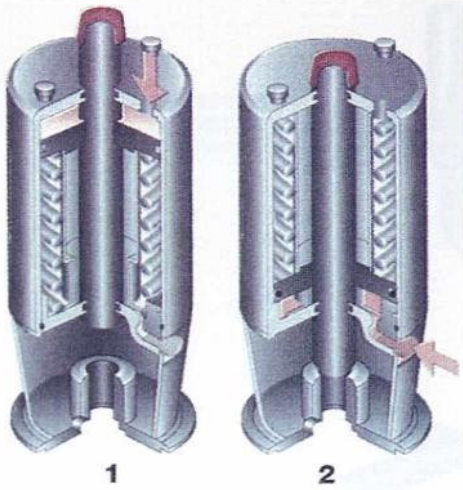


Fig. 6.8.8 *Ejemplos de actuadores accionados neumaticamente.*
1. *Válvula abierta por muelle. Cerrada con aire comprimido.*
2. *Válvula cerrada por muelle. Abierta con aire comprimido.*

Fig. 6.8.9 *La indicación de la posición del obturador de la válvula se dispone sobre la parte superior del actuador.*

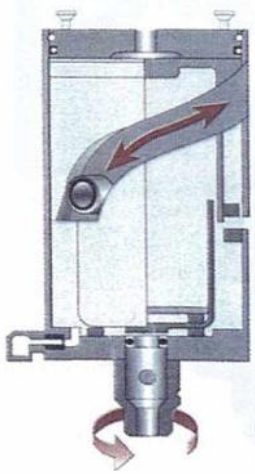


Fig. 6.8.11 *Principio del dispositivo actuador por aire para las válvulas de mariposa.*

re comprimido y cerrada con un muelle o viceversa. Puede ser también abierta y cerrada por aire comprimido (Figura 6.8.8).

Existen también actuadores para posiciones intermedias del obturador y para apertura y cierre en dos etapas.

La unidad de control de la válvula (Figura 6.8.9) normalmente se coloca sobre la parte superior del actuador de la válvula como una unidad separada. Esta unidad normalmente dispone de sensores de indicación de posición para que la posición de la válvula retroalimente al sistema de control principal.

Una válvula solenoide de cierre se instala en la conducción del aire que va hacia el actuador de la válvula o la unidad superior. Una señal eléctrica excita la válvula solenoide, permitiendo la entrada de aire comprimido en el actuador. De esta manera, la válvula cierra o abre según se necesite. En su camino hacia la válvula, el aire comprimido pasa a través de un filtro para eliminar aceite o cualquier sustancia extraña que pudiese afectar al funcionamiento adecuado de dicha válvula. El suministro de aire se corta cuando la válvula solenoide deja de ser activada y el aire que aún queda en la válvula de producto es evacuado a través de una vía de salida en la válvula solenoide.

Válvulas de mariposa

La válvula de mariposa (Figura 6.8.10) es una válvula de cierre. Para realizar la función de desviación de flujo se pueden utilizar dos válvulas de este tipo.

Las válvulas de mariposa se utilizan a veces para productos sensibles, tales como yogur y otros productos lácteos fermentados, ya que la restricción al paso que ofrece la válvula es muy pequeña, por lo que se consiguen muy pequeñas pérdidas de carga y que no haya turbulencia. También, son adecuadas para productos de elevada viscosidad y, como se trata de una válvula de paso recto, se puede colocar en tuberías rectas.

Este tipo de válvula consta de dos mitades idénticas unidas mediante una abrazadera (constituida por dos bridas atornilladas) con una junta anular entre ellas. En el centro de la válvula se dispone un disco soportado por dos ejes para evitar que se agarrote el vástago sobre los cuerpos de la válvula.

Si el disco está en la posición abierta, la válvula ofrece muy poca resistencia al flujo. En la posición cerrada el disco cierra apoyándose sobre el anillo de sellado.

Control manual

La válvula de mariposa se instala con una manivela, normalmente de dos posiciones -abierta y cerrada.

Este tipo de válvula no se aconseja como válvula de control, aunque se puede utilizar para control no preciso con una manivela de infinitas posiciones.

Control automático

Para el control automático de la válvula de mariposa se puede utilizar un actuador de aire comprimido (Figura 6.8.11). Esta función puede ser:

- Cierre por resorte /apertura por aire (Normalmente cerrada, NC)
- Cierre por aire/apertura por resorte (Normalmente abierta, NA)
- Apertura y cierre por aire (A/A)

El disco se gira fácilmente hasta que toque el anillo de sellado. A continuación se necesita más potencia para comprimir la junta de goma. Un actuador accionado

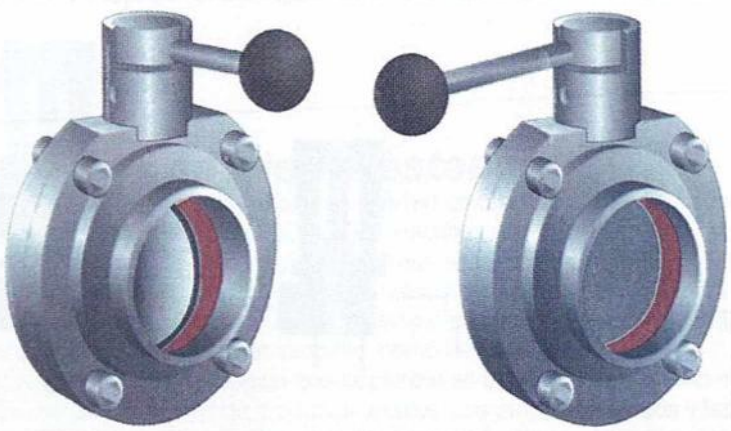


Fig. 6.8.10 *Válvula de de mariposa controlada manualmente en posición abierta (izquierda) y en posición cerrada (derecha).*

por muelle es más fuerte al principio, cuando menos potencia se requiere, y es menos efectivo al final, cuando se requiere más potencia. Por lo tanto es una ventaje utilizar actuadores que se diseñan de forma que proporcionan la potencia adecuada en el momento que se necesita.

Otro tipo de válvula de mariposa es la válvula "sandwich" que se muestra en la Figura 6.8.12. Es del mismo tipo que la válvula de mariposa descrita anteriormente, pero se instala entre dos bridas soldadas a la tubería. Su función es la misma que la de una válvula de mariposa normal. Durante su funcionamiento está cogida entre las bridas con tornillos. Para el mantenimiento se sueltan los tornillos. Las partes de la válvula se pueden entonces separar para su inspección.

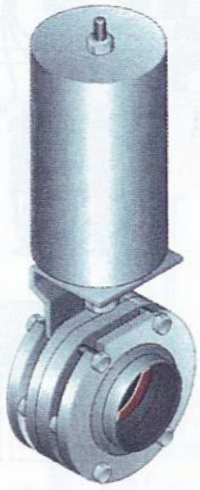


Fig. 6.8.12 *Válvula de maripora, tipo "sandwich", accionada neumáticamente. Diseño de matenimiento simple.*

Válvulas estancas

Las válvulas estancas (Figura 6.8.14) pueden ser de doble o simple asiento, pero cuando se habla de válvulas estancas generalmente se trata del tipo de doble asiento (Figura 6.8.13).

Una válvula de doble asiento tiene dos sellos independientes que separan los dos líquidos interponiendo una cámara de drenaje. Esta cámara debe estar abierta a la atmósfera para asegurar una estanqueidad total aunque los dos sellos tengan fugas. Cuando se activa una válvula estanca de doble asiento, la cámara comprendida entre el cuerpo superior e inferior se cierra y entonces la válvula abre para conectar las tuberías superior e inferior. Cuando la válvula se cierra, primero el obturador superior cierra y a continuación la cámara de fugas se abre a la atmósfera. Esto da lugar a pérdidas muy pequeñas de producto durante la operación.

Un aspecto importante es que el obturador inferior debe estar equilibrado hidraúlicamente para evitar golpes de presión provocados por la apertura de la válvula y evitar que los productos se mezclen.

Durante la limpieza uno de los obturadores se levanta, o una línea CIP externa se conecta a la cámara de fugas. Algunas válvulas se pueden conectar a una fuente externa de limpieza para limpiar aquellas partes del obturador que hayan estado en contacto con el producto.

La válvula estanca de simple asiento tiene un asiento y dos sellos, pero en el mismo obturador. El area entre los dos sellos está abierta a la atmósfera. Esta cámara de drenado de fugas se cierra por medio de pequeñas válvulas de cierre antes de que la válvula estanca de simple asiento se active. Una linea CIP externa se conecta a la linea de drenado a través de pequeñas válvulas para su limpieza.

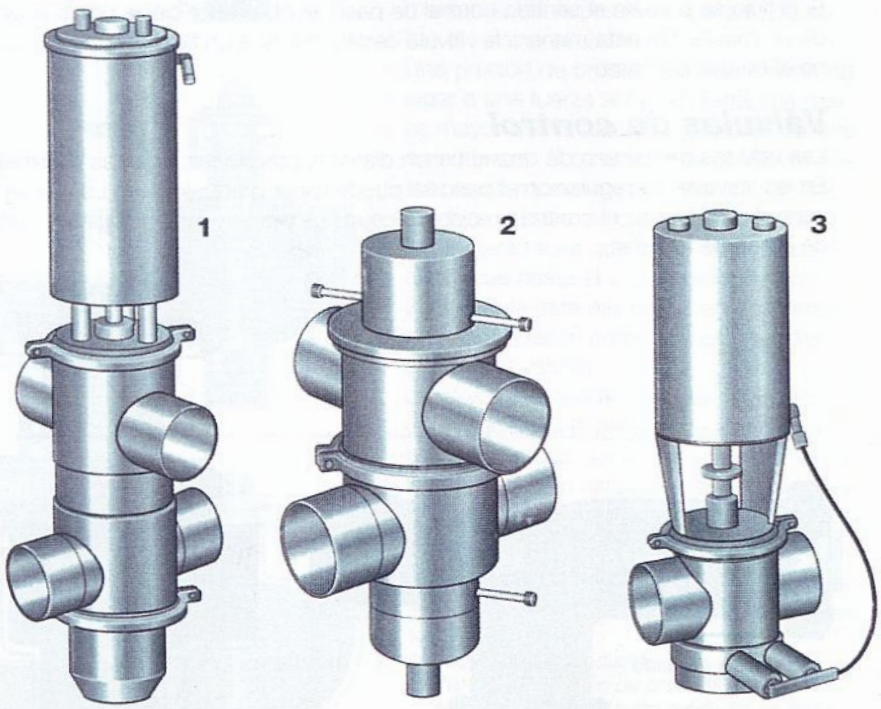


Fig. 6.8.14 *Tres tipos de válvulas de varias vías.*
1. Válvula de doble asiento con limpieza de vástago
2. Válvula de doble asiento con limpieza externa
3. Válvula de doble asiento con limpieza externa

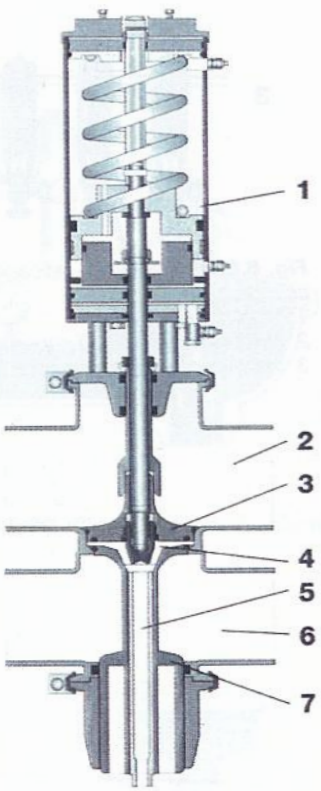


Fig. 6.8.13 *Válvula de varia vías de doble asiento con obturador equilibrado y vástago interior*
1. Actualidor
2. Boca superior
3. Obturador superior
4. Cámara de fugas con vía de drenaje
5. Eje hueco conectado a la atmósfera
6. Boca Inferior
7. Obturador inferior con equilibrador.

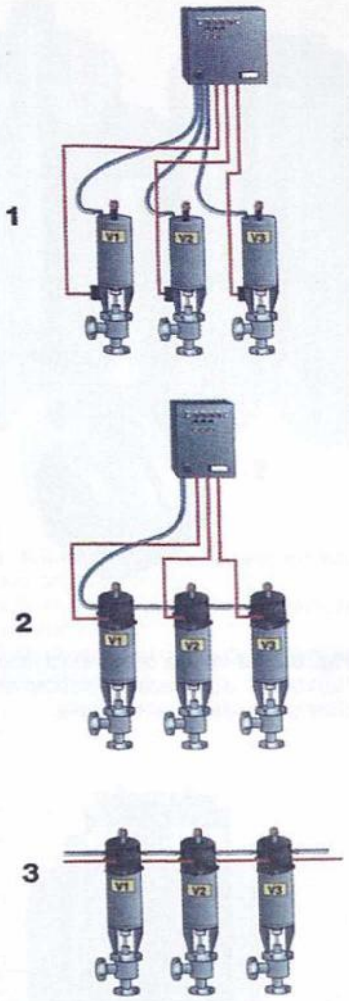


Fig. 6.8.15 *Sistema de indicación de posición de la válvula.*
1. Sólo indicación
2. Indicación con unidad superior
3. Indicación y sistema de control

Indicación de posición y control

Sólo indicación de posición

Una válvula se puede instalar con distintos tipos de indicación de posición (Figura 6.8.15) dependiendo del sistema de control de la planta. Los distintos interruptores utilizados son microinterruptores, interruptores de proximidad inductivos o elementos Hall. Los interruptores se utilizan con señales de retroalimentación para el sistema de control.Cuando se instalan en las válvulas solamente interruptores, es necesario tener una válvula solenoide para cada válvula en un armario de válvulas solenoide instalado en la pared. Una válvula solenoide suministra aire comprimido a la válvula de producto cuando recibe una señal y relaja la presión de aire cuando la señal desaparece.

El sistema (1) requiere un cable eléctrico y un tubo de aire para cada válvula.

La unidad combinada (2) se instala normalmente en la parte superior del actuador de la válvula. Contiene los mismos tipos de indicadores de posición que los citados anteriormente, pero la válvula solenoide está también instalada en la parte superior. Esto quiere decir que una misma tubería de aire puede abastecer a muchas válvulas, aunque se necesita en este caso también un cable eléctrico por válvula.

Control más moderno

Este se lleva a cabo por medio de una unidad de indicación de posición, como la que se muestra en la Figura 6.8.9, que está especialmente diseñada para control por ordenador. Contiene indicador de posición, válvula solenoide y una unidad electrónica. Con esta unidad es posible controlar hasta 120 válvulas con un solo cable y una unica conducción de aire (Figura 6.8.15, ref. 3). Una unidad como esta puede ser programada desde un sistema central de control, y tiene unos costes de instalación bajos.

Algunos sistemas también pueden, sin señales externas, actuar sobre las válvulas para limpiar el asiento. También pueden contar el número de emboladas de la válvula. Esto se puede utilizar para el programa de mantenimiento.

Válvulas antirretorno

Una válvula de retención o antirretorno (Figura 6.8.16) se utiliza cuando es necesario evitar que el producto fluya en una dirección errónea. La válvula permanece normalmente abierta gracias al flujo del líquido que circula en la dirección correcta. Si el flujo se para en el sentido normal de paso, el obturador cierra por la acción de un muelle. De esta manera la válvula cerrará frente a un flujo en sentido contrario al normal de paso.

Válvulas de control

Las válvulas de cierre o de desvío tienen distintas posiciones, abiertas o cerradas. En las válvulas de regulación el paso se puede variar gradualmente. La válvula de control se utiliza en el control preciso de caudales y presiones en distintos puntos de la red de tuberías.

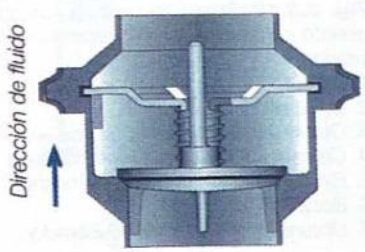


Fig. 6.8.16 *Válvula antirretorno.*

Fig. 6.8.17 *Válvula de alivio de presión.*

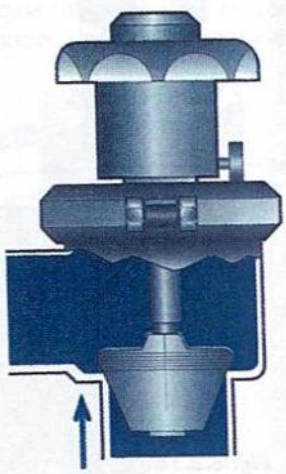


Fig. 6.8.18 *Válvula de control manual con obturador de flujo variable.*

Una **válvula de alivio de presión** (Figura 6.8.17) mantiene la presión en un sistema. Si la presión es baja, el muelle mantiene el obturador en posición de cierre sobre el asiento. Si la presión aumenta hasta cierto valor, la fuerza sobre el obturador sobrepasa la resistencia del muelle (que mantiene la válvula normalmente cerrada) y la válvula se abre. La presión de apertura se fija de antemano en un cierto nivel ajustando la tensión del muelle.

Válvula de control manual con obturador de caudal variable (Figura 6.8.18). Esta válvula tiene un vástago con un obturador de forma especial. Cuando la manivela de regulación se gira, el obturador se mueve hacia arriba o abajo, variando el paso y de esta manera el caudal o la presión. Una escala sobre la válvula indica el ajuste.

La **válvula de control neumático con obturador de caudal variable** (Figura 6.8.19) trabaja de forma similar a la válvula descrita previamente. La disposición obturador-asiento es similar a la de la válvula de accionamiento manual. El caudal es gradualmente estrangulado a medida que el obturador se baja y aproxima al asiento.

Este tipo de válvula se utiliza en el control automático de presión, caudal y niveles en proceso. Un transmisor se dispone en la línea de proceso y continuamente transmite el valor medido al controlador. Este controlador entonces ajusta la posición de la válvula de forma que el valor consigna se mantenga.

Una válvula que se utiliza con cierta frecuencia es la **válvula de presión constante** (Figura 6.8.20). El aire comprimido se suministra a través de una válvula reductora al espacio existente sobre el diafragma. La presión de aire se ajusta mediante la válvula reductora hasta que la presión del producto muestra la presión requerida. La presión consigna es entonces mantenida a pesar de los cambios que se puedan producir en las condiciones de operación. La Figura 6.8.21 describe la función de la válvula de presión constante. La válvula reacciona rapidamente frente a cambios en la presión del producto. Una presión reducida de producto da lugar a una fuerza mayor sobre el diafragma por efecto de la presión del aire, que permanece constante. El obturador de la válvula entonces se mueve hacia abajo con el diafragma, siendo reducido el caudal y aumentando así la presión del producto sobre el valor preestablecido.

Una presión de producto incrementada da lugar a una fuerza sobre el diafragma que es mayor que la fuerza hacia abajo del aire comprimido. El obturador de la válvula entonces se mueve hacia arriba, incrementándose el paso de producto. El caudal aumentará hasta que la presión de producto cae hasta el valor preestablecido. Esta válvula está disponible en dos versiones para presión constante antes o después de la válvula.

La válvula no puede controlar la presión del producto si la presión de aire disponible es más baja que la presión de producto requerida. En estos casos se puede instalar un "*booster*", dispositivo de incremen-

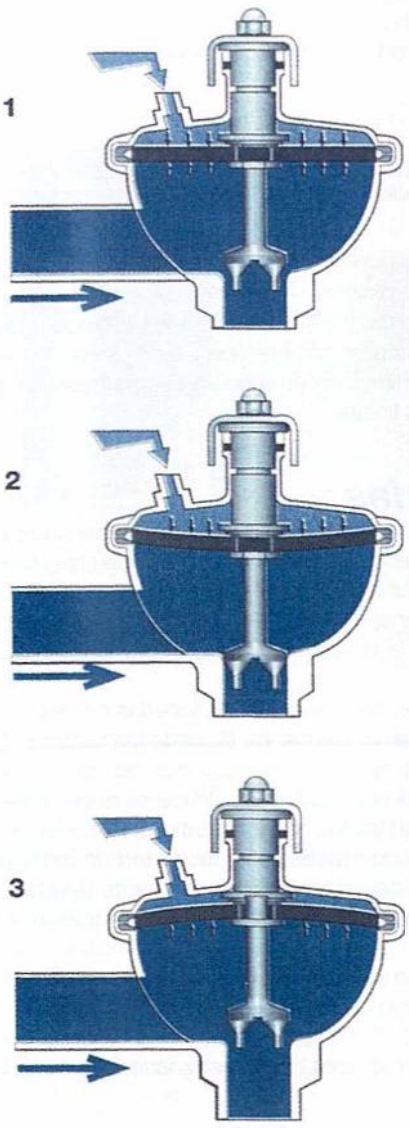


Fig. 6.8.21 *Funcionamiento de una válvula de presión constante con regulación de presión anterior a la válvula.*
1. *Equilibrio aire/producto.*
2. *Perdida de presión de producto, la válvula se cierra y la presión del producto se incrementa hasta el valor prefijado.*
3. *La presión del producto se incrementa, y la válvula se abre, de forma que la presión del producto cae hasta el valor prefijado.*

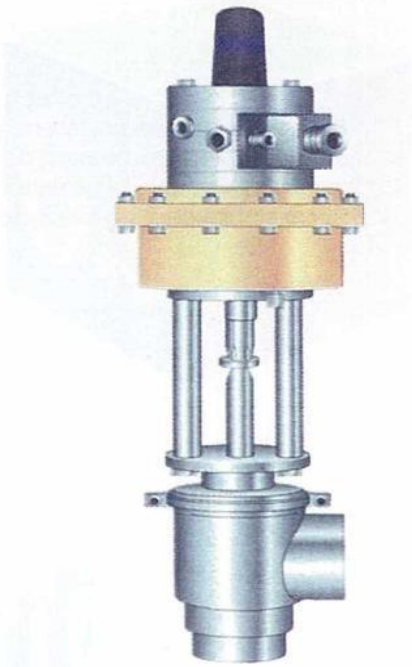


Fig. 6.8.19 *Válvula de control neumático con obtulador de flujo variable.*

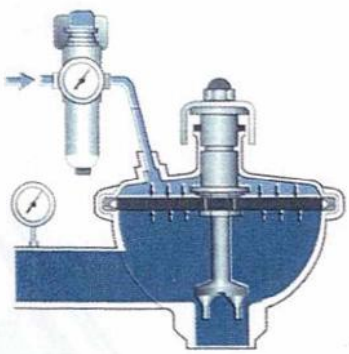


Fig. 6.8.20 *Válvula de presión constante.*

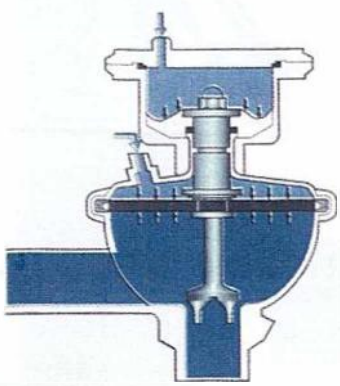


Fig. 6.8.22 *Válvula modulante de presión constante con una unidad de refuerzo (booster) para el control de productos con presión más elevada que la presión de aire disponible.*

Debe existir siempre una abertura de drenaje libre entre el paso del producto y liquidos del sistema CIP, y entre producto y producto.

to de presión, en la parte superior de la válvula (Figura 6.8.22). De esta manera la válvula se puede utilizar para presiones de producto superiores a dos veces la presión disponible del aire.

Las válvulas de presión de entrada constante se utilizan frecuentemente después de las desnatadoras y pasteurizadores. Las de presión de salida constante se utilizan antes de las máquinas de llenado.

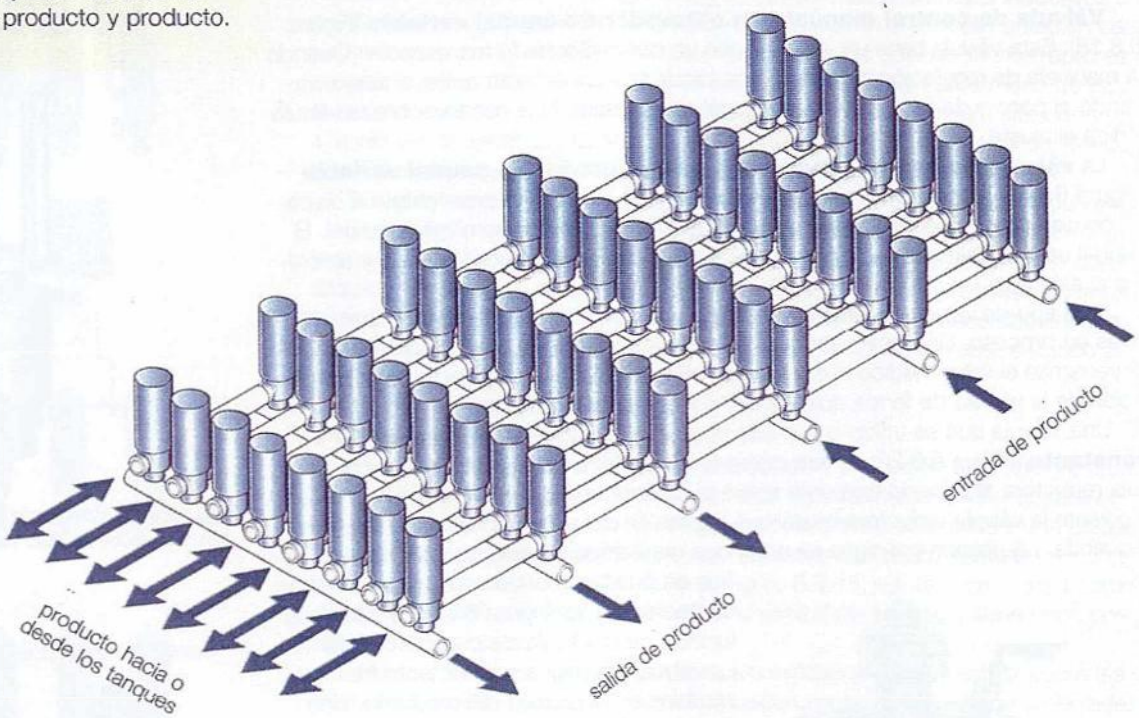


Fig. 6.8.23 *Montaje de válvulas para el servicio a una sala de tanques de proceso, para la circulación independiente de productos y soluciones de limpieza hacia y desde los tanques.*

Sistemas de válvulas

Las válvulas se disponen en grupos para minimizar terminales de línea muertos y conseguir que se distribuya el producto entre las diferentes partes o bloques dentro de la industria láctea. Las válvulas se utilizan también para aislar lineas individuales de forma que una linea pueda ser limpiada de manera segura mientras que el producto puede fluir por el resto de las líneas.

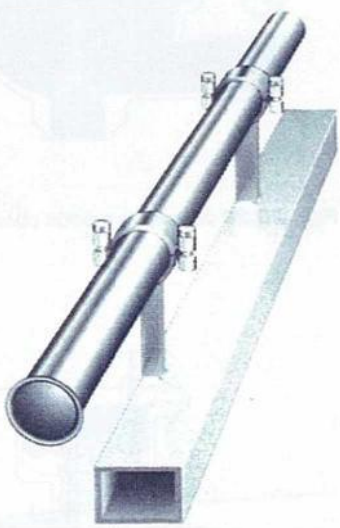


Fig. 6.8.24 *Ejemplo de soportes normalizados para tuberías.*

Soportes para tuberías

Las tuberías se colocan normalmente a unos 2-3 metros por encima del suelo de la industria. Todos los componentes deben ser de fácil acceso para su inspección y mantenimiento. Las líneas deben tener una ligera inclinación (1:200-1:1000), con objeto de conseguir un efecto de autodrenaje. No deben existir bolsas o puntos de retención a lo largo de la linea, donde el producto o las soluciones de limpieza puedan acumularse.

Las tuberías deben estar firmemente sujetas, aunque las tuberías no deben de estar tan fijas que no puedan tener un ligero movimiento. Durante los tratamientos, dichas tuberias se expanden considerablemente, en especial cuando las temperaturas de los productos son altas y durante la limpieza, por lo que se debe prever la absorción del correspondiente aumento en las fuerzas longitudinales y de torsión en los codos y en los equipos. Esto pone de manifiesto la necesidad de cierta precisión y experiencia en el diseñador del sistema, teniéndose en cuenta también que los numerosos y distintos componentes del sistema de tuberías hacen que éste sea muy pesado.

Tanques

Los tanques en la industria láctea se utilizan en gran cantidad de operaciones. Los tamaños oscilan entre 150.000 litros de los tanques silo de los departamentos de recepción, y los aproximadamente 100 litros de los tanques más pequeños.

Los tanques se pueden dividir en dos grandes categorías de acuerdo con su función:

- tanques de almacenamiento
- tanques de proceso

Tanques de almacenamiento

Tanques silo

Los tanques silo para la recepción de la leche pertenecen a la categoría de los depósitos de almacenamiento que han sido descritos en el epígrafe "Recogida y recepción de la leche". Varían en tamaño desde 25.000 hasta unos 150.000 litros y las superficies en contacto con el producto son de acero inoxidable. Se colocan a veces en el exterior con objeto de ahorrar costes en edificios.

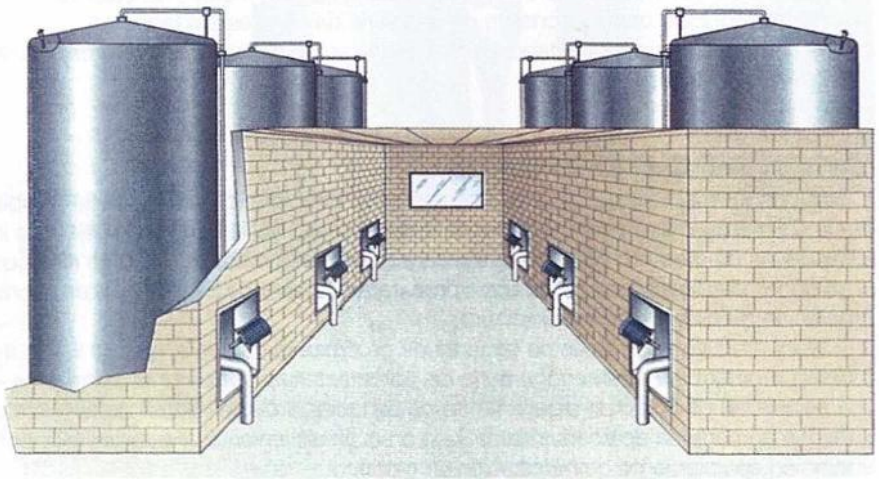


Fig. 6.9.1 *Disposición de tanques silo exteriores con bocas de hombre dispuestas en registros situados sobre las paredes de una estación de control cubierta.*

En estos casos los tanques están aislados normalmente. Tiene una doble pared con un mínimo de 70 mm de aislamiento de lana mineral. La pared exterior puede ser de acero inoxidable, pero, por razones de economía, normalmente es de acero al carbono, cubierta con una pintura anticorrosiva.

Con objeto de facilitar un drenaje completo, el fondo del depósito es inclinado (con un 6% hacia la salida). Esto viene a veces regulado en las normas de algunos paises.

Los tanques silo están provistos de diferentes tipos de agitadores, y equipos de monitorización y control.

El número y tamaño de los tanques silo viene determinado por factores tales como la entrada diaria de leche, el número de dias laborables por semana, el número de horas laborables por día (1, 2 ó 3 turnos), el número de productos diferentes a fabricar y las cantidades de los mismos.

Fig. 6.9.2 *Registro de tanque silo con boca de hombre y motor de accionamiento del agitador.*

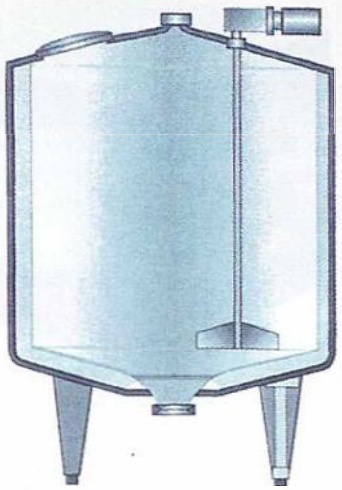


Fig. 6.9.3 *Tanque de almacenamiento típico con una capacidad de 1.000-50.000 litros.*

Depósitos intermedios de almacenamiento

Estos depósitos se utilizan para almacenar un producto durante un periodo corto de tiempo antes de que continúe a la línea de proceso. Son también utilizados como depósitos pulmón o reguladores, para absorber variaciones en el caudal de producto en proceso. Después del tratamiento térmico y del enfriamiento, la leche se bombea hacia un depósito de regulación, y desde allí al llenado. Si la operación de llenado es interrumpida, la leche procesada se mantiene en dicho depósito hasta que se pueda reanudar la operación. Igualmente, la leche contenida en este depósito puede ser empleada durante una parada temporal del proceso.

En los tanques de almacenamiento (Figura 6.9.3), con una capacidad de 1.000 a 50.000 litros la pared interior es de acero inoxidable. El depósito se aisla con objeto de asegurar una temperatura constante para el producto. En este caso, la pared exterior es también de acero inoxidable, con una capa aislante de lana mineral entre ambas paredes.

El depósito de almacenamiento va provisto de un agitador y puede equiparse con varios componentes y sistemas para limpieza, y para control de nivel y temperatura. Este equipamiento es básicamente el mismo que el que se ha descrito anteriormente para los tanques silo.

Una buena hipótesis es que el proceso requiere una capacidad de tanques pulmón que se corresponde con 1.5 horas de capacidad normal de producción. Por ejemplo, 1.5x20.000 = 30.000 litros.

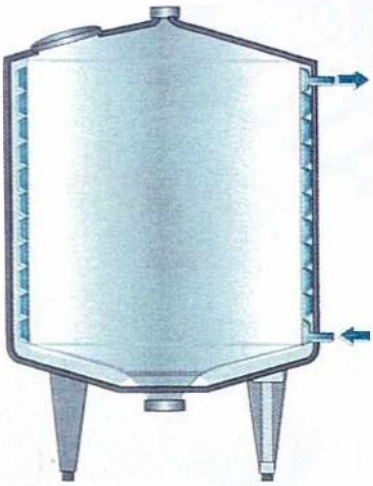


Fig. 6.9.4 *Tanque mezcla con camisa de calentamiento/enfriamiento.*

Depósitos de mezcla

Como indica su nombre, estos depósitos o tanques de mezcla (Figura 6.9.4) son utilizados para mezclar diferentes productos y para incorporar diversos ingredientes al producto principal. Estos depósitos pueden ser aislados o con una pared simple de acero inoxidable. Se pueden equipar con dispositivos para el control de temperatura. Los tanques aislados, con lana mineral entre las paredes exterior e interior, tienen una camisa colocada en la cara interior de la pared interna que soporta el aislamiento, a través de la cual se bombean los medios de calentamiento-enfriamiento. Esta camisa consiste en una serie de canales soldados.

Los agitadores para los tanques de mezcla son diseñados de acuerdo con las aplicaciones especificas.

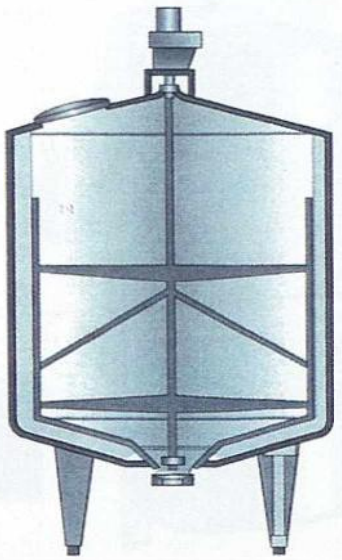


Fig. 6.9.5 *Tanque de proceso aislado con agitador/rascador de superficie para productos viscosos.*

Tanques de proceso

En estos depósitos (Figura 6.9.5) los productos son tratados con el fin de cambiar sus características. Son muy utilizados en industrias lácteas, como por ejemplo los depósitos de maduración para nata y para productos ácidos tales como el yogur, asi como los depósitos de cristalización para nata batida, y depósitos para la preparación de cultivos lácticos iniciadores.

Hay muchos tipos distintos de tanques de proceso. El uso al que se vayan a destinar determina su diseño. Alguna de las características comunes entre ellos es la necesidad de disponer de alguna forma de agitación y de control de temperatura. Tienen paredes de acero inoxidable, con o sin aislamiento. Y pueden incorporar también equipamiento de monitorización y control.

Tanque de regulación

Existen diferentes problemas asociados con el transporte del producto a través de la línea:

- El producto que se maneja debe estar libre de aire o gases si se desea que la bomba centrífuga funcione correctamente.
- Para evitar la cavitación, la presión en todos los puntos en la entrada a la bomba debe ser más alta que la presión de vapor del líquido.
- Se debe disponer de una válvula que actúe desviando el líquido no tratado, si su temperatura baja por debajo del valor requerido.
- La presión del tramo de aspiración de la bomba se debe mantener constante para asegurar un caudal uniforme en la línea.

Estos problemas, así como otros que se tratan en este apartado, se resuelven a menudo instalando un tanque de equilibrado o regulación en la línea de aspiración de la bomba. Este tipo de tanque mantiene el producto con un nivel de líquido constante sobre el nivel de entrada a la bomba. En otras palabras, la carga en la aspiración se mantiene constante.

El tanque de la Figura 6.9.6 contiene un flotador conectado a un rodillo pivotado excentricamente que actúa sobre la válvula de entrada en el tanque. Conforme se mueve el flotador hacia arriba o hacia bajo según sea el nivel de líquido, la válvula se cierra o se abre respectivamente.

Si la bomba extrae más líquido del tanque que entra en éste, el nivel cae y el flotador también. Esto provoca que la válvula se abra y deje pasar líquido al tanque de equilibrado. De esta manera, el líquido en el tanque se mantiene con un nivel constante.

La entrada se localiza al fondo del tanque para que el líquido entre por debajo de la superficie libre. De esta manera no chapotea y, sobre todo, no se airea el líquido. Cualquier cantidad de aire que posea el líquido a la entrada subirá a la parte superior del tanque. Cierta desaireación tiene lugar de esta forma. Esto tiene un efecto favorable sobre el funcionamiento de la bomba, y el producto es tratado de forma más delicada.

El tanque de regulación se incluye frecuentemente dentro de un sistema de recirculación donde el líquido se retorna, por ejemplo como consecuencia de un tratamiento insuficiente. En este caso el indicador de temperatura actúa sobre una válvula de desviación de flujo que dirige al producto hacia el tanque de equilibrado. Esto provoca un rápido incremento de nivel de líquido y un movimiento igualmente rápido del mecanismo del flotador que hace que se cierre la válvula. El producto entonces circula hasta que el fallo ha sido reparado o se para la planta para su ajuste. Un procedimiento similar se emplea en la circulación de soluciones de limpieza cuando la línea ya está limpia.

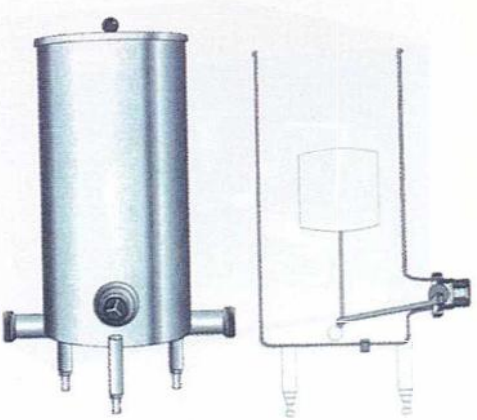


Fig. 6.9.6 *Tanque de regulación para presión de entrada constante a la bomba.*

Fig. 6.9.7 *Los tanques de regulación están disponibles según diferentes tamaños.*

Control de proceso

Automatización

La naturaleza de las operaciones de las industrias lácteas ha cambiado rápidamente durante las últimas cinco décadas. La pequeña industria láctea local, con muchas operaciones manuales ha quedado obsoleta y ha sido reemplazada por grandes unidades de producción, con un mayor funcionamiento de gran industria.

Las consecuencias de esta tendencia han sido muchas y de gran alcance. Los procesos en las pequeñas industrias lácteas eran supervisados y controlados por unos pocos operarios bien adiestrados que llevaban a cabo manualmente la mayoría de la operaciones y también limpiaban a mano el equipamiento al final de la jornada. Conforme las industrias han ido aumentando de tamaño, tanto el número como el tamaño de los equipos también han aumentado, así como el número de operaciones manuales requeridas. La limpieza, en particular era una tarea bastante laboriosa -cada máquina que hubiese entrado en contacto con el producto tenía que ser desmontada y limpiada a mano al menos una vez al día.

La limpieza CIP (Cleaning-In-Place) se introdujo a mediados de los años cincuenta y hoy se utiliza prácticamente en todas las industrias lácteas. Esto significa que las máquinas ya no necesitan ser desmontadas para su limpieza. Se diseñan para que puedan ser limpiadas con soluciones detergentes que se pasan a través de las líneas de producto de acuerdo con un programa de limpieza establecido.

La mecanización de las distintas operaciones de las industrias lácteas se ha ido imponiendo gradualmente, realizándose cada vez más a máquina los trabajos que eran manuales y pesados. La mecanización, junto con la rápida expansión de la capacidad de producción, también dió lugar a un incremento importante en el número de operaciones que tenían que ser ejecutadas. Se tenían que manejar más válvulas, y más motores se tenían que poner en marcha y parar. El tiempo de realización de las operaciones individuales también era cada vez más crítico. La operación de una válvula demasiado pronto o demasiado tarde, por ejemplo, podía dar lugar a pérdidas de producto. Cada malfunción en el proceso, y cada error de decisión de un operador, podía tener serias consecuencias económicas y sobre la calidad.

Conforme ha ido pasando el tiempo, se han ido introduciendo más dispositivos de control a distancia. Las válvulas manejadas manualmente eran reemplazadas por válvulas eléctricas y neumáticas. Los interruptores para activación y cierre de válvulas, bombas, agitadores y otros motores eran montados en paneles de control. Los transmisores se instalaban para transmitir el estado del proceso (presiones, niveles, temperaturas, pH, caudales, etc.). Para notificar al operador que las válvulas y motores han respondido correctamente (abierto/cerrado y comienzo/parada), los componentes eran equipados con dispositivos que transmiten señales de retroalimentación. Cada vez se hacía más posible automatizar el proceso.

¿Qué es la automatización?

Estrictamente hablando, los conceptos de mecanización y control remoto a los que se refiere la introducción anterior no tienen nada que ver con la automatización como tal, sino que son pasos necesarios para que se dé la automatización. Automatización quiere decir que todas las acciones necesarias para controlar un proceso de manera óptima son manejadas por un sistema de control sobre la base de instrucciones que han sido previamente programadas.

- Se utiliza una interface de operador por parte del operador del proceso para comunicarse con el sistema de control y el proceso.
- Los modernos sistemas automáticos normalmente incluyen también Información de Datos de Gestión que se utilizan para informes, estadísticas, análisis, etc.

En un proceso automático el sistema de control debe comunicarse con cada componente controlado y cada transmisor. Son ejemplos de este tipo de señales entre el sistema de control y el proceso que controla:

- las señales de salida (comando) que actúan sobre los componentes del proceso;
- las señales de entrada (retroalimentación) que proceden de las válvulas y motores que informan al sistema de control que el componente en cuestión ha sido accionado;
- señales de entrada (analógicas) procedente de los transmisores de temperatura, presión, y otros transmisores que proporcionan información sobre el estado actual de las variables de proceso;
- señales de entrada procedente de los "monitores" del sistema, como transmisores que informan cuándo se ha alcanzado una condición determinada. Ejemplos de tales condiciones son el nivel máximo de un tanque, la temperatura mínima preestablecida, etc.

Las señales son procesadas por la unidad lógica del sistema de control. Antes de continuar es interesante estudiar el significado del término lógica.

Fig. 6.10.1 *Uso de la lógica por parte del operador, para resolver un problema de control.*

Lógica

La lógica es algo fundamental en automática. Denota el mecanismo de toma de decisiones que hace que sea posible desarrollar una tarea dada de acuerdo con un modelo determinado. La mente humana está programada por la educación y la experiencia para desarrollar una tarea de una cierta manera. La Figura 6.10.1 muestra cómo un operador utiliza la lógica para resolver un problema de control que consiste en abastecer a una línea de proceso con leche procedente de una batería de tanques. El recibe información de los procesos, por ejemplo que el tanque T1 pronto se vaciará, que el tanque T2 actualmente se está limpiando, que el tanque T3 está lleno de producto, etc. El operador procesa esta información lógicamente. La figura muestra el intento de solución, la serie de preguntas que se formula, y las decisiones que toma. Finalmente, toma sus decisiones pulsando botones sobre el panel para actuar sobre las válvulas apropiadas, bombas y otros componentes.

El operador no tiene gran dificultad en resolver este problema de control. Aún existen posibilidades de error. El detergente se puede mezclar con la leche por error. La línea de proceso puede funcionar sin leche, produciéndose el quemado de las superficies de transferencia de calor. La leche de los tanques se puede perder con los efluentes cuando el tanque se limpia. El riesgo de estos errores aumenta si el operador es responsable al mismo tiempo de varias secciones similares de proceso. Puede estar apresurado y bajo estrés, lo que aumenta el riesgo de que tome decisiones equivocadas.

A primera vista es fácil tener la impresión de que el operador se enfrenta constantemente con el hecho de seleccionar entre un gran número de alternativas de solución de problemas de control. Un estudio más detallado revela que no es así. Como consecuencia de muchas horas de operación en la industria láctea se establecen normalmente unas secuencias de control que son las que se ha comprobado que dan lugar a una calidad óptima de producto, y unas condiciones óptimas de seguridad y economía. En otras palabras, el operador adquiere normalmente una lógica de control más o menos permanente. Toma decisiones gracias a unas rutinas previamente establecidas, por ejemplo utiliza un reloj para controlar el vaciado de leche de un tanque, conoce exactamente cuándo interrumpir el llenado de un tanque para minimizar las pérdidas de producto, etc. Cada proceso puede ser analizado de esta manera. Es posible entonces, sobre la base del análisis, determinar la lógica de control que da lugar a unos óptimos resultados.

¿Por qué es necesario el control automático de los procesos?

Cuando se diseña una industria láctea es necesario tener en cuenta diversos factores. La solución final es siempre un compromiso entre factores relativos al pro-

ducto, al proceso y factores económicos, con requisitos externos a la planta que también deben ser satisfechos. Estos requisitos externos son entre otros la mano de obra necesaria, tipo y cantidad de producto, calidad del producto, higiene, legislación, disponibilidades de producción, flexibilidad y economía.

Los factores relativos al producto incluyen las materias primas, los tratamientos realizados sobre el producto y la calidad del producto final, mientras que los factores relativos al proceso incluyen la selección de los equipos según una serie de condiciones externas. Aunque las líneas de proceso de la planta son seleccionadas principalmente con el objeto de conseguir la calidad deseada de producto, es necesario tener en cuenta otros requisitos, sobre todo si se va a fabricar toda una serie de productos diferentes. Por ejemplo, esos otros requisitos se pueden referir a los sistemas de limpieza de los equipos y la idoneidad de éstos para ser conectados a los sistemas de limpieza que sean propuestos. Se deben de tener en cuenta también otros aspectos como, por ejemplo, el consumo de energía y de fluidos caloportadores, o la necesidad de determinados sistemas de control en el equipo de que se trate. Es importante apuntar aquí que cuando se va a seleccionar el equipo de proceso se ha de considerar al mismo tiempo la solución de su automatización.

La correcta aplicación de la automatización, teniendo en cuenta el producto, el proceso y el equipo de proceso, tiene muchas ventajas. Las más importantes son:

- seguridad
- calidad de producto
- fiabilidad
- economía en la producción
- flexibilidad de producción
- control de la producción

Las ventajas más importantes de la automatización son:
- Seguridad
- Calidad de producto
- Fiabilidad
- Disminución de costes de producción
- Producción flexible
- Control de producción

La seguridad viene garantizada por el hecho de que el sistema de control siempre trabaja y controla el proceso de la misma manera durante cada turno de trabajo. Se evitan errores tales como la mezcla de distintos productos, el llenado hasta rebosar de depósitos, etc., que dan lugar a pérdidas de producto y a problemas en la producción.

El hecho de que todas las etapas del proceso sean siempre controladas de la misma manera quiere decir que el producto final tendrá siempre la misma alta calidad si se escogen las variables de proceso de manera que se obtengan los mejores resultados.

Un control preciso del proceso significa que las pérdidas de producto y el consumo de servicios, soluciones de limpieza y energía se mantienen en un mínimo absoluto. La economía de producción de un sistema de control bien diseñado y adaptado es, por lo tanto, muy buena.

Una producción flexible se puede conseguir mediante la programación del sistema de automatización con diferentes alternativas de producción y recetas de producción. La producción se puede cambiar simplemente alterando una receta sin necesidad de reprogramar.

El sistema de automatización puede también suministrar importantes datos e información para la producción en forma de informes, estadísticas, análisis, etc. Estos datos son herramientas para la toma de decisiones de forma más precisa.

Las cuatro tareas de un sistema de automatización son:
1. Control digital
2. Control analógico
3. Monitorización
4. Información de gestión

¿Cuáles son las tareas de control?

Las tareas de control de un sistema automatizado se pueden dividir en las siguientes cuatro categorías:

1. Control digital.
2. Control analógico.
3. Monitorización/supervisión.
4. Información de gestión.

Control digital

Este tipo de control se basa en el hecho de que los objetos controlados se pueden encontrar en dos estados diferentes: funcionando o parados (Figura 6.10.2). Un motor puede estar funcionando o parado, y una válvula puede estar abierta o cerrada, o en una de la dos posiciones. Sobre estas bases se pueden utilizar niveles de automatización completamente diferentes:

A. Control remoto, que significa que los objetos simples son controlados desde un panel de control, siendo simplemente como una extensión del brazo del control manual. Este nivel no debe ser considerado como automatización.

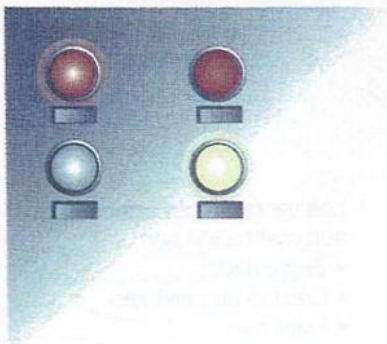


Fig. 6.10.2 *El control digital se podría representar mediante interruptores marcha/parada.*

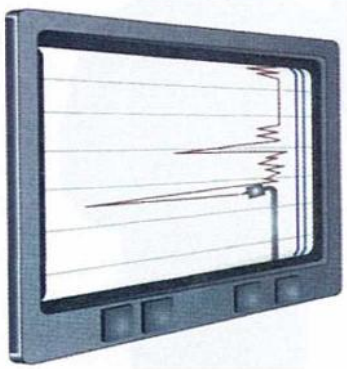


Fig. 6.10.3 *Un ejemplo de control analógico sería el control de la temperatura de pasteurización.*

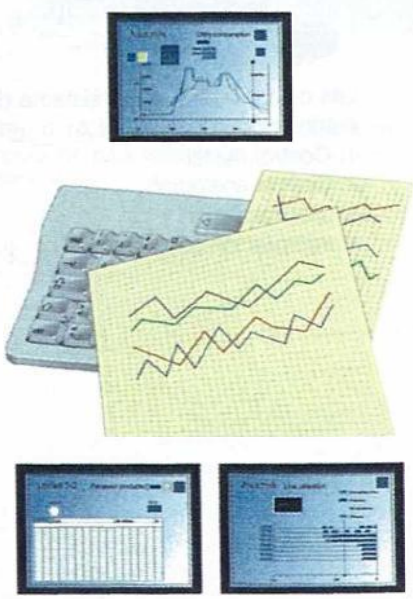


Fig. 6.10.4 *La información de gestión hace posible mejorar la productividad.*

B. Control de grupo, que significa que un grupo de objetos es controlado al mismo tiempo, como, por ejemplo, un grupo de válvulas situadas debajo de un depósito.
C. Control de funciones, como puede ser la apertura y cierre de líneas de producto en el proceso o el control de la agitación.
D. Control secuencial, donde una serie de funciones son realizadas una detrás de otra, en un determinado orden. Son ejemplos de secuencias:

- lavado con diferentes soluciones de limpieza en una secuencia determinada previamente y durante tiempos también fijados con antelacion;
- preselección del camino a recorrer por un producto y los niveles de llenado del mismo,
- arranque de un pasteurizador.

El nivel de automatización D, es decir, el control secuencial, se utiliza actualmente con objeto de obtener todas las ventajas que ofrece la capacidad de los modernos sistemas de control.

Control analógico

En este caso (Figura 6.10.3) el objeto es controlado por medio de señales analógicas desde una unidad de control. Normalmente, este tipo de control se basa en otra señal que realimenta (que varía de forma continua) a la unidad de control. Por ejemplo, este tipo de control se utiliza para controlar el suministro de vapor o de agua caliente a un pasteurizador. La señal de realimentación a la unidad de control viene desde el transmisor de la temperatura de pasteurización.

El control analógico es muy importante para el funcionamiento de los procesos lácteos. En la industria láctea, el control analógico es normalmente bastante simple y el número de circuitos de control analógico es también bastante pequeño. Las aplicaciones más importantes son:

- pasterizadores;
- sistemas de pesado, incluyendo frecuentemente el manejo de recetas y el mezclado;
- control de las capacidades de bombeo;
- normalización del contenido en materia seca o grasa.

A menudo el sistema de control incluye ambos sistemas de control analógico y digital, ya que son complementarios. Un sistema analógico es el que se utiliza para el control del calentamiento en un pasteurizador, mientras que un sensor de temperatura monitoriza la temperatura. Dicho sensor detecta de forma inmediata si la temperatura cae por debajo del valor prefijado. Entonces, se transmite una señal a la unidad de control y el pasteurizador cambia el sentido del flujo.

Monitorización/supervisión

Los diferentes objetos del proceso y las etapas del mismo se monitorizan/supervisan de forma que se dispara una alarma en el sistema si se produce un fallo.

La supervisión se basa en las señales de realimentación procedentes de los objetos. Estas señales pueden ser diseñadas de varias formas:

- Supervisión simple de ciertos objetos críticos.
- Registro simple de condiciones de fallo.
- Interconexiones que evitan que las funciones comiencen o continúen si se reciben señales de que se ha producido un fallo. Por ejemplo, se puede evitar que comience un ciclo de limpieza si la señal de bajo nivel procedente del depósito que se va a limpiar no se ha recibido.
- Reinicio automático de las funciones, cuando el fallo ha sido corregido.

Una parte muy importante de la supervisión es el chequeo continuo que el sistema de control realiza por sí mismo y que se llama autodiagnóstico.

Información de gestión

Con los ordenadores es posible mejorar la productividad, no sólo a nivel de fábrica, sino también a nivel de dirección. Con ellos se pueden recoger y analizar datos y presentarlos de tal forma que la gestión pueda basar en ellos las decisiones (Figura 6.10.4). Los modernos sistemas tienen esta capacidad. Algunos ejemplos de rutinas de gestión son:

- Almacenamiento de datos (con recogida de datos procedentes del proceso).
- Seguimiento de la producción, de forma que el sistema de control mantiene un libro de seguimiento de todas las unidades de proceso y productos de la planta.

- Registro de la producción, donde los datos de producción son registrados y procesados, ya que son de utilidad en la preparación de informes de producción de productos finales e intermedios. Los informes se pueden generar a intervalos previamente establecidos, por lotes, días o meses.
- Análisis de costes, que hace posible la evaluación de la economía de la planta. Los factores que se han de considerar son la capacidad de producción, consumo de servicios y utilización de máquinas y líneas de proceso.
- Planificación de la producción, que es una herramienta para una mayor eficiencia y una utilización óptima de la maquinaria de la fábrica. La información que se recibe de manera ordenada se procesa y computa con datos procedentes de las unidades de proceso. El resultado es un plan de producción diario para la industria láctea, por ejemplo, un plan detallado para la producción diaria incluyendo las máquinas llenadoras (productos, tipos de envases, tamaños, etc.).
- Planificación del mantenimiento, que puede hacerse de forma mucho más eficaz si los responsables tienen acceso a datos referentes a las horas que ha funcionado cada máquina y cuánto tiempo han entrado en funcionamiento las válvulas desde el último mantenimiento.
- Garantía de calidad. Un fallo en el funcionamiento puede localizarse fácilmente con la ayuda de la información procedente del ordenador.

Fig. 6.10.5 *Los datos de proceso se pueden visualizar en el Sistema de Información de Gestión.*

¿Qué decide el nivel de automatización?

El nivel de automatización se decide al mismo tiempo que se seleccionan los equipos de proceso para la planta. Es por ello esencial realizar una investigación concienzuda de hasta qué punto los equipos seleccionados afectan las posibilidades de automatización. Para ello se necesita un conocimiento de todos los sistemas de una industria láctea.

A la hora de diseñar y llegar a soluciones concretas es necesario tener en cuenta los requisitos especiales del sistema de automatización. Entre dichos requisitos se encuentra la interacción con el operador, por ejemplo, las rutinas de corrección de fallos. Otro factor muy importante a la hora de determinar el nivel de automatización es la cantidad de información manejada y el grado de información de gestión que se necesita en la planta.

Fig. 6.10.6 *Los datos de proceso se presentan sobre un monitor.*

Funciones del operador

La automatización no se utiliza para que la presencia del operador sea superflua, sino para aumentar su poder y alcance. Cuanto más sofisticado es un sistema, menos detalles tiene que controlar el operador. El programa debe manejar todas las operaciones rutinarias del proceso, las maniobras, etc., mientras que el operador humano será responsable de las decisiones de mando, es decir, de la estrategia a seguir. Ejemplos de acciones que son responsabilidad directa del operador serán la preselección de depósitos para la producción, la puesta en marcha del sistema CIP (limpieza automática) de diferentes equipos, cambios de tiempo, temperaturas y otros parámetros de producción en el programa, y las decisiones referentes a las medidas que se deben de tomar en caso de producirse fallos. El operador cuenta con una serie de elementos que le ayudan a realizar su función:

- consola o pantalla gráfica (VDU, Video Display Unit, o pantalla de TV),
- impresoras,
- paneles locales de operador.

Pantalla gráfica

Las pantallas gráficas (Figura 6.10.6) son los equipos de operador más utilizados actualmente. Se debe prestar una atención especial a la ergonomía de los colores y gráficos. Los factores más importantes son el diseño de los gráficos, el uso de colores, el uso de símbolos, la manera de interactuar, la jerarquía de imágenes, etc. Un buen diseño ayudará al operador en su trabajo dándole la información correcta, en el momento oportuno, y de la forma más adecuada (Figura 6.10.7). Este es el factor clave en la mejora de la seguridad de operación.

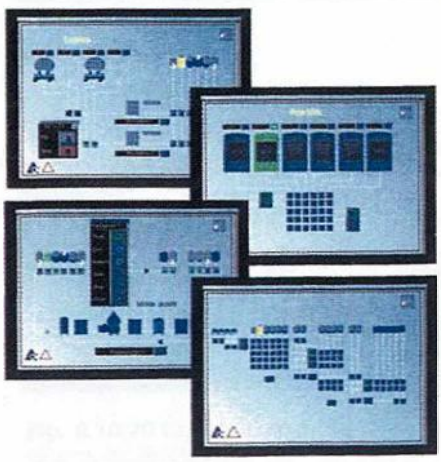


Fig. 6.10.7 *Ejemplos de información de operador y pantallas de interacción en monitor.*

Terminal de impresión

La impresora tiene dos funciones principales. La primera es suministrar información impresa procedente del controlador del proceso, como informes de fallos o estadísticas para gestión. La segunda función es la de suministrar copias impresas de pantallas que puede mostrar la VDU. De esta manera se obtiene información

Fig. 6.10.8 *Unidad de operador local de un pasteurizador.*

gráfica como curvas de temperatura de pasteurización o tendencias de consumos de servicios, para tener todos estos aspectos de la producción perfectamente documentados.

Unidades locales de operador

Estas unidades se instalan en aquellos lugares de las áreas de proceso donde conviene tener un control local, o donde se tiene la necesidad de tomar información local. Ejemplos son el área de recepción, la estación CIP, pasteurizadores, (Figura 6.10.8) y máquinas de llenado. Los paneles locales de operación pueden ser de varios tipos -pequeñas cajas con botones de accionamiento y pilotos indicadores, o paneles basados en microprocesador con pequeña pantalla y teclado.

Funcionamiento del sistema de control

El control se ejecuta mediante un sistema lógico, suministrando señales de salida en un orden determinado, para que actúen o dejen de actuar los diversos componentes involucrados en el proceso controlado, de forma que se satisfagan las condiciones lógicas que se aplican al proceso. Los componentes envian señales de reconocimiento confirmando que las órdenes han sido cumplidas. Estas señales de realimentación al sistema lógico son utilizadas como condiciones que permiten que se active la siguiente etapa en la secuencia fijada. En la Figura 6.10.9 se muestra la disposición, en principio, del sistema de control.

Si no se recibe la señal de realimentación se puede activar una señal de alarma. En este caso, el proceso se detiene o entra en funcionamiento otra parte del sistema lógico para responder a la nueva situación que se ha generado. En este caso, se sobreentiende que el fallo en cuestión puede ser predicho. Cuanto más complicados sean los procesos y más estrictas sean las exigencias sobre la seguridad y economía, más grandes y completos deben ser los sistemas lógicos.

Todos los transmisores y todos los dispositivos o equipos controlados en el proceso están conectados al sistema lógico. De esta forma, el sistema de control tiene siempre la información necesaria referente a temperaturas, caudales, presiones, etc. Después de procesar todas estas señales, el sistema lógico transmite señales de salida a los diferentes dispositivos o equipos del proceso que se está controlando.

En las unidades especiales de entrada/salida (3), las señales que salen o que van al proceso (4) son convertidas a la forma correcta para su tratamiento por el sistema lógico computerizado.

Todo el equipo que necesita el operador está también conectado al mencionado sistema lógico: pantalla (1), impresora (2) y paneles locales de operador.

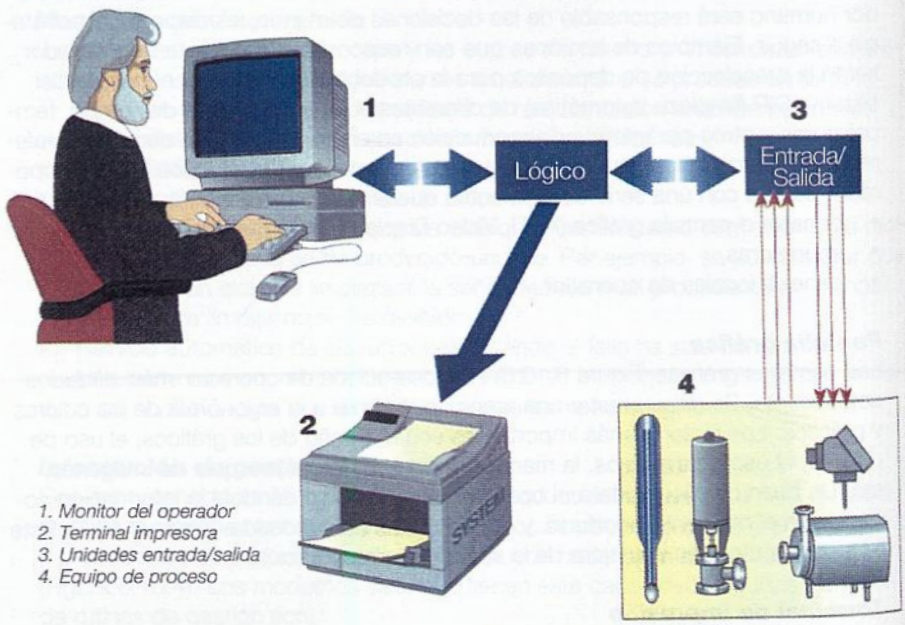


Fig. 6.10.9 *Principio de un sistema de control de proceso.*

El sistema de control programable

La automatización es un campo que está en constante transformación. Hace apenas unos años, los sistemas de control de proceso para automatización de plantas consistían en relés electromecánicos unidos entre sí de forma lógica. Pero en la actualidad han sido reemplazados por componentes electrónicos que son más rápidos y fiables y que no tienen ninguna parte móvil.

El paso siguiente lo han constituido los sistemas de control programables, con el sistema lógico almacenado en la memoria del ordenador y no en la disposición física del cableado. De esta forma es más fácil cambiar el programa cuando sea necesario, así como reducir el coste de los equipos.

En los nuevos sistemas de control, los diseñadores han utilizado la creciente capacidad y el reducido coste de los ordenadores y microprocesadores para distribuir las funciones de control a las unidades locales. Esto da al sistema como tal una gran flexibilidad y un potencial muy alto. Los nuevos procesadores pueden utilizarse para controlar una sola máquina, o para confeccionar el sistema de gestión y control total de una planta completa, de forma que ésta sea más productiva.

Normalmente, los sistemas de automatización comprenden tanto los PLCs (Programmable Logic Controllers = controladores lógicos programables) como los ordenadores (ej.: PCs, Personal Computers = Ordenadores Personales). Originalmente, el PLC fue una pequeña copia del ordenador grande, pero la frontera entre los PLCs y los ordenadores ha desaparecido en gran medida al hacerse cada vez más grandes los PLCs.

Exigencias del sistema de control

En la actualidad, a un moderno sistema de control de proceso se le exige flexibilidad, fiabilidad y economía. Esto quiere decir que:

- El VDU de operador debe ser confortable y eficaz;
- El crecimiento del sistema debe ser sencillo;
- El lenguaje del programa debe ser eficaz;
- El sistema debe incluir soluciones electrónicas eficaces;
- El sistema debe ofrecer software para tests de diagnóstico, modificaciones on line y simulación.

Para garantizar la máxima flexibilidad, fiabilidad y economía los sistemas modernos de control de proceso deben satisfacer las siguientes exigencias:

- El monitor debe ser eficiente y apropiado para el usuario.
- El sistema debe ser fácilmente ampliable.
- El lenguaje de programación debe ser eficiente.
- El sistema debe incluir soluciones electrónicas eficientes.
- El sistema debe incluir, también, software para tests de diagnóstico, modificación y simulación.

Ampliación del sistema de control

Existen en el mercado muchos sistemas de automatización que son muy versátiles y que podrían probablemente adaptarse a cualquier plan de producción. Una de las exigencias más importantes para un sistema de esta clase es la posibilidad de ser ampliado cuando se necesite. Debe ser posible construir un sistema de cualquier tamaño, pasa a paso, añadiendo componentes estándar. Un pequeño controlador instalado en una línea de recepción puede ser posteriormente ampliado para controlar el tratamiento de la leche, el envasado, etc., simplemente por adición de nuevos equipos de control del mismo sistema. Al mismo tiempo, las rutinas de gestión pueden ser insertadas en los procesadores disponibles o en ordenadores especiales de mando.

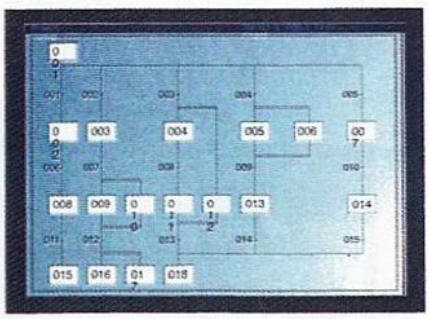
A la hora de ampliar un proceso es muy importante que todos los componentes del sistema comprendidos entre el operador y el proceso, desde el sensor remoto hasta la consola del operador, sean partes del mismo sistema. Más adelante se tratará un ejemplo de ampliación de un sistema de control.

Lenguajes simples de programación

El lenguaje de programación, con la ayuda de diagramas de flujo (Figura 6.10.10), debe diseñarse para facilitar el trabajo de las personas que no son expertas en ordenadores, de forma que puedan comprender y escribir el programa del proceso, la descripción formal de la funciones del proceso.

El lenguaje debe ser de alto nivel, que significa que se ha de parecer lo más posible al lenguaje humano. Por ello será fácil de entender para un profano. El diseño del lenguaje debe permitir que el programa-aplicación sea dividido en módulos, cada uno definiendo una tarea específica, tal como el llenado de un depósito, la limpieza de una red de tuberías o la impresión de datos de producción. Esto hace que el lenguaje sea fácil de comprender y simplifica el mantenimiento y la comprobación del programa-aplicación. Con un lenguaje de alto nivel de este tipo, el operador aprende rápidamente a comunicarse con el sistema. El operador comienza entendiendo las partes básicas del sistema y gradualmente va ampliando su vocabulario, hasta el punto que comunicarse con el sistema le resulta tan fácil

1



2

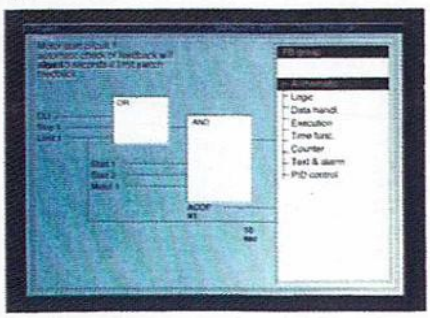


Fig. 6.10.10 *Las funciones de ayuda extensiva, las descripciones de bloque de función (1) y los diagramas de función secuencial (2) constituyen un lenguaje potente y fácil de usar en programación.*

como hablar con un compañero. De esta forma, tiene un instrumento muy poderoso con el que controlar su proceso.

Soluciones electrónicas eficaces

Un control de proceso que trabaje de forma eficaz necesita soluciones electrónicas de primera categoría en el proceso. El funcionamiento del sistema completo de control automático del proceso se puede ver en peligro si los transmisores y los sensores no funcionan de forma adecuada.

Un ejemplo de una buena solución electrónica es el sistema de control de válvulas que aparece en la Figura 6.10.11. El funcionamiento de una industria láctea de cualquier dimensión incluye la operación de cientos o incluso miles de válvulas en diferentes combinaciones y secuencias. Los controladores lógicos programables (PLCs) son ideales para recordar la combinación que se necesita para un determinado propósito y para implementar dicha combinación en el tiempo mínimo posible. Para conseguir esto, la unidad de control necesita un canal para asegurar una comunicación instantánea con todas las válvulas. Esto hace que la instalación sea cara, por lo que los nuevos sistemas de válvulas han sido desarrollados para evitar ésto.

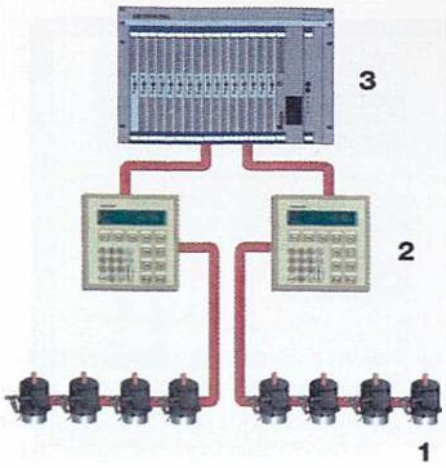


Fig. 6.10.11 *Sistema de control de válvulas.*
1. Válvulas
2. Modem
3. Sistema de control (PLC)

El nuevo sistema consta de una serie de unidades de válvula (1), una por cada válvula. Estas unidades se conectan a un cable común y a una línea de aire comprimido también común. El cable se conecta también a un modem (2) que comunica con el sistema de control (3). La instalación ha sido simplificada en gran medida, por lo que un sistema de control de este tipo es mucho más barato que el sistema tradicional.

Es posible operar hasta 120 válvulas a través de un único cable, que también transmite la potencia a todas ellas. Varios modems -cada uno controlando 120 válvulas- se pueden conectar en serie a un sistema de automatización.

Otra ventaja importante del sistema es que es un sistema de dos vías. Cuando se le ordena abrir o cerrar, la unidad de control de la válvula informa que dicha operación ha sido realizada. El modem examina el estado en que se encuentran todas las válvulas de forma continua, informando instantáneamente al controlador del proceso de cualquier malfunción o fallo. Esto hace que se encuentre con más rapidez y facilidad el fallo y que se pueda subsanar de forma también más rápida y eficaz, especialmente si es posible desconectar las unidades individuales de las válvulas sin interferir con la operación de otras unidades del sistema.

Ejemplos de sistemas de control

El pequeño controlador PLC

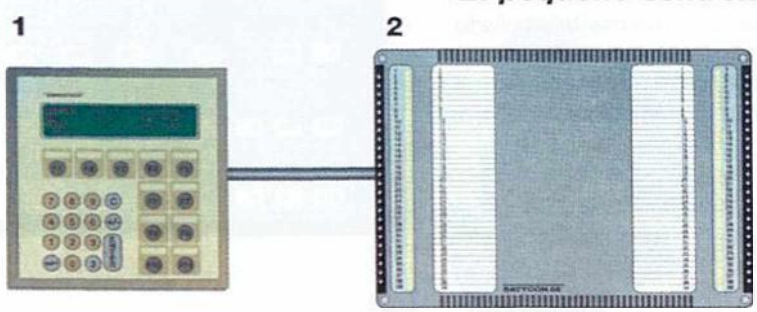


Fig. 6.10.12 *Sistema de control para automatización de un equipo*
1. Unidad de operador
2. PLC con Entrada/Salida integrada

La Figura 6.10.12 muestra un pequeño controlador PLC para automatización de ciertos puntos del proceso, como puede ser una máquina o un subproceso. Por ejemplo, se puede tratar de la recepción de leche, de un pasteurizador o de un sistema de limpieza. Otras aplicaciones del controlador PLC podrían ser la recepción de materiales, operaciones discontinuas, fermentaciones, esterilizaciones, cocción, envasado, etc.

La unidad es un controlador programable basado en microprocesador con hasta 240 entradas y salidas, conectado al equipo de proceso. Las entradas se corresponden con señales del estado del proceso en un momento determinado (lecturas de temperatura, posiciones de válvulas, etc.), y las señales de salida transmiten señales de comando a las bombas, válvulas y motores.

La Figura 6.10.13 muestra otro PLC controlando una línea de recepción de leche. El microprocesador incluido en la unidad examina constantemente las entradas, comparando los valores de las variables de estado del proceso con las instrucciones dadas en el programa, y realizando de manera automática las acciones que sean necesarias.

En un sistema como es este PLC, las instrucciones se reciben normalmente de un operador situado en un panel de control cercano. La unidad PLC también puede ser conectada a una VDU para mensajes de comando, programación y diagnóstico. Alternativamente, las instrucciones pueden provenir de otra unidad de control.

Control descentralizado del proceso

Si el sistema de control se va a extender a una línea de proceso completa o incluso a varias líneas, la capacidad de memoria, comunicación y cálculo que puede suministrar el PLC no es suficiente (Figura 6.10.13).

El sistema de automatización se configura con distintas unidades estándar:

- Controladores de proceso (1). La cantidad o los controladores necesarios dependen del tamaño de la parte del proceso que va a ser automatizada, así como de la disposición física de los componentes.
- Interfaces de operador (2). Estas consistirán normalmente en una o más VDUs gráficas en color, dependiendo del número de operadores y áreas de responsabilidad de proceso.
- Cableado de red (3). Es el corazón de las comunicaciones entre las diferentes unidades. Los controladores de proceso y VDUs se conectan todos a la red.

Los controladores de proceso tienen todos sus propias areas de proceso a controlar, y se comunican entre ellos por medio de la red. En otras palabras, es perfectamente factible automatizar una planta completa conectando varios controladores de proceso a la red, y tener una o más estaciones de operador conectadas a la misma red.

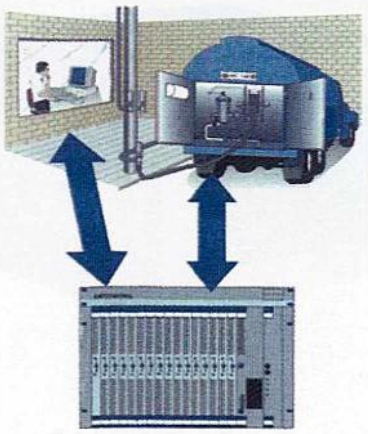


Fig. 6.10.13 *Pequeño sistema controlado mediante PLC.*

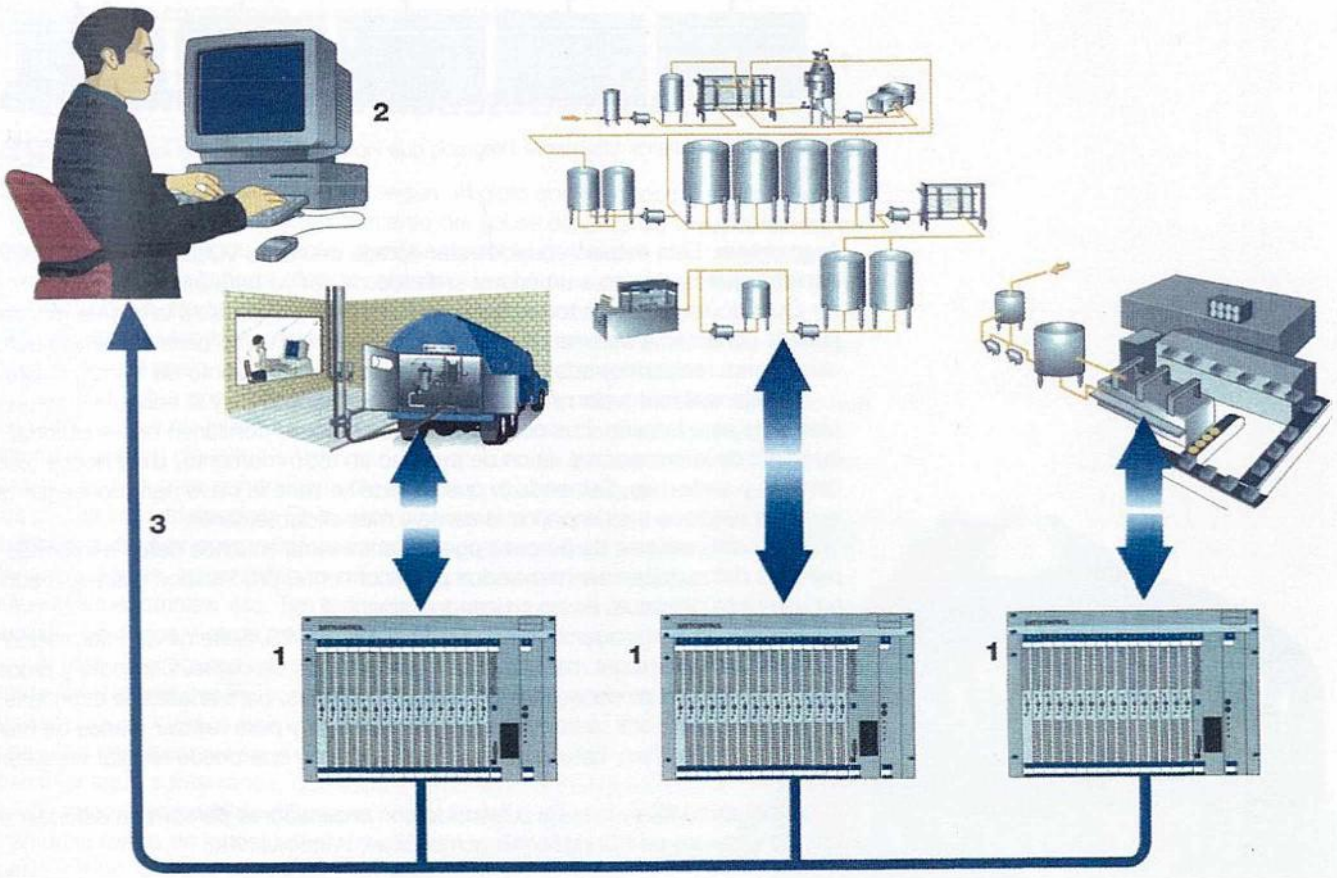


Fig. 6.10.14 *Gran sistema de automatización descentralizado.*

1. Controlador de proceso
2. Monitor de operador
3. Cable de red

Control integrado total de la planta

La etapa siguiente es configurar un sistema de control de planta integrado totalmente. En la estructura de un sistema de automatización como este, la planta consta de más de un área de proceso, por ejemplo, de producción de mantequilla, queso, leche líquida. Cada área tiene una configuración de varios controladores de proceso (1) que normalmente tendrán sus propias estaciones de operador (2), que reciben productos de un área y suministran productos a otra.

Dentro de cada área una red de comunicación se conecta a las diferentes unidades.

La misma red está entonces interconectada con todas las otras áreas, por lo que se pueden intercambiar entre ellas datos, órdenes, etc. También se puede conectar a la red una estación central de operador para control de la planta de pro-

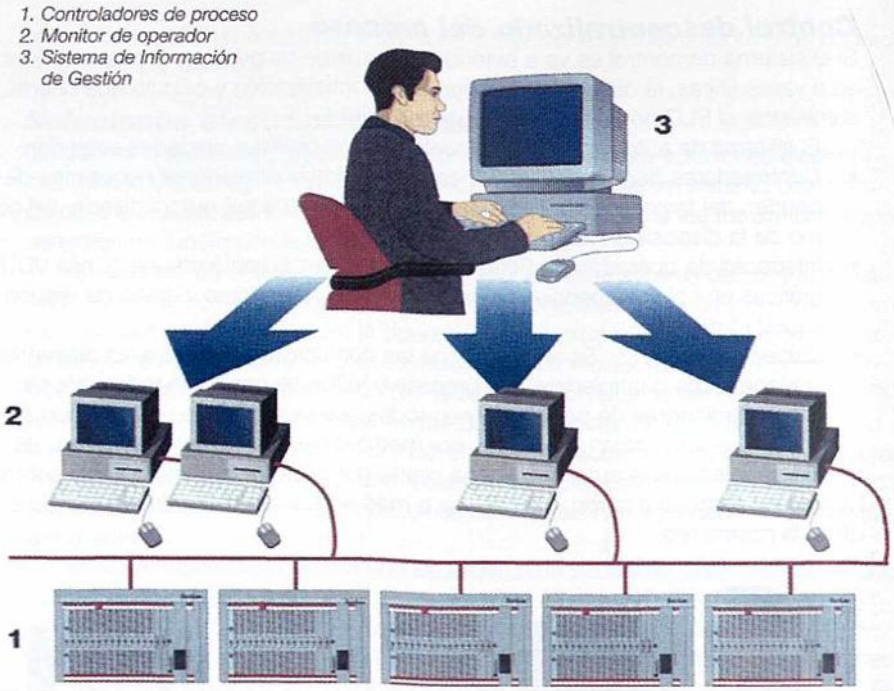


Fig. 6.10.15 *Sistema totalmente integrado que incluye un Sistema de Información de Gestión.*

ceso entera. Esta estación puede estar dotada de varios VDUs gráficos en color, dedicándose cada uno a un área y sirviendo de apoyo para otra área.

Cuando se conectan todos los controladores de la planta a la misma red, es posible conectar al sistema una Terminal de Mantenimiento central. Esta se puede utilizar para realizar entradas de re-programación, seguimiento de fallos y ajuste.

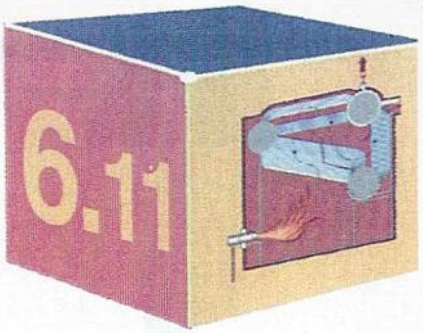
Es esencial mantener un seguimiento de la producción y la economía en una planta de este tamaño. Los controladores de proceso contienen una sustancial cantidad de información y datos de proceso en todo momento, día y noche, cada semana y cada mes. Sabiendo lo que sucede se tiene la clave para conseguir que la planta funcione más económicamente y más eficientemente.

Los controladores de proceso pueden suministrar muchos datos e informes, pero los datos deben ser manejados posteriormente, procesados y almacenados en una base de datos, en un ordenador separado (3).

Un moderno Management Information System (MIS, Sistema de Información de Gestión) se dedica a manejar grandes volumenes de datos. Computa y procesa los datos para producir distintos tipos de informes, para analizar la economía de la producción, etc., para asistir a la planificación y para realizar planes de mantenimiento preventivo. Estos son ejemplos de tareas que puede realizar un sistema MIS.

El sistema MIS se maneja a menudo con ordenadores personales estándar utilizando software de PC estándar, como Excel, Windows, etc.

Sistemas auxiliares



Necesidades en la elaboración de productos lácteos

Para que puedan llevarse a cabo las distintas operaciones en la elaboración de los productos lácteos es necesario tener toda una serie de instalaciones auxiliares, como instalaciones de agua, instalaciones de vapor, de agua caliente, instalaciones frigoríficas, aire comprimido e instalaciones eléctricas.

Equipamiento de abastecimiento de agua

En la naturaleza, el agua se mueve según un ciclo continuo, como se aprecia en la Figura 6.11.1. A causa del calentamiento del sol se evapora de la superficie de los océanos, mares y lagos. El agua queda suspendida en el aire y es transportada por el viento hacia la tierra, donde se enfría, se condensa y cae en forma de lluvia, granizo o nieve. Parte de dicha agua, el agua superficial, corre sobre la tierra hacia lagos y ríos, volviendo de esta forma al mar. El resto se filtra a través de las capas superiores del suelo y queda en la tierra como agua subterránea.

El agua actúa como disolvente para muchas sustancias, hasta el punto de que en la naturaleza no existe agua en estado puro. Gases tales como el dióxido de azufre aparecen disueltos en el agua, incluso cuando ésta se encuentra en el aire, causando lo que se denomina la "lluvia ácida", que es un gran problema en los países industrializados. En cuanto alcanza el suelo el agua comienza también a disolver sustancias diversas. El agua superficial arrastra materias orgánicas, insecticidas, productos químicos procedentes de efluentes industriales, etc. También, de la parte superior del suelo arrastra bacterias y otros microorganismos.

Al filtrarse el agua a través de las diversas capas del suelo, gran parte del material orgánico, así como una cierta proporción de organismos y productos químicos son eliminados. Al mismo tiempo, una serie de sales que se encuentran de forma natural en el suelo pasan al agua subterránea, que llega a tener unas concentraciones relativamente grandes de diferentes sales. Dichas sales se encuentran en la forma de iones, tales como los de sodio, potasio, magnesio, calcio, cloruro, carbonato, nitrato y sulfato.

El agua subterránea es, por lo tanto, la menos contaminada, pero su composición varía de un lugar a otro, según la descarga de aguas residuales, las condiciones del suelo y otros muchos factores. Las sustancias disueltas y en suspensión en el agua pueden provocar problemas en las industrias lácteas. El agua que entra en una industria debe ser, por lo tanto, tratada para reducir la concentración de sustancias perjudiciales presentes en la misma, o bien neutralizarlas o eliminarlas.

La mayor parte de los paises tienen legislaciones muy estrictas referentes al contenido de microorganismos y compuestos tóxicos en las aguas. Esta legislación establece con precisión los tipos de análisis, los métodos de muestreo y los intervalos entre toma de muestras. Las enfermedades que pueden transmitir las aguas son principalmente de tipo intestinal, por lo que las pruebas de bacterias patógenas se concentran a veces en la *E. coli*. Si la *E. coli* se encuentra presente en cantidades significativas, quiere decir que hay una contaminación fecal.

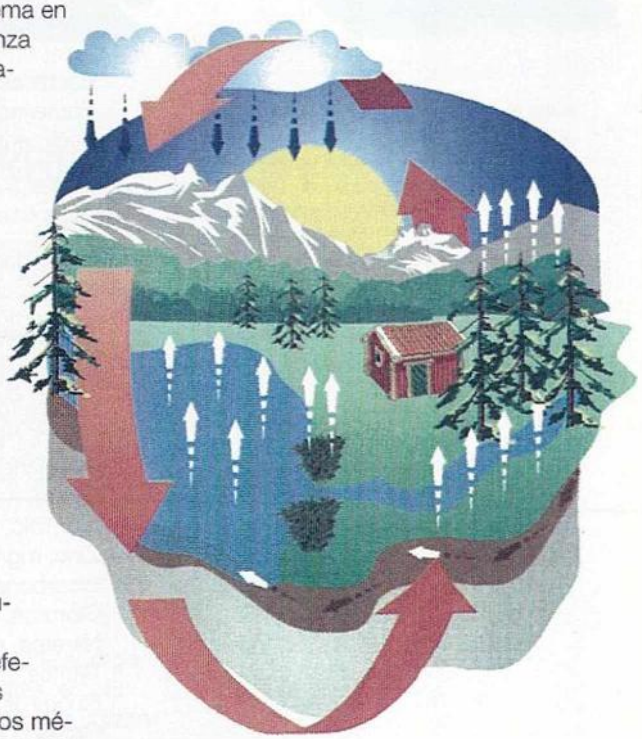


Fig. 6.11.1 *El ciclo del agua en la naturaleza.*

Fig. 6.11.2 *Pozo con bomba sumergible.*

Las industrias lácteas consumen grandes cantidades de agua para usos diversos, como en los tratamientos previos de los productos lácteos, el lavado de los equipos, enfriamiento y limpieza. La cantidad utilizada varía de una industria a otra dependiendo de los métodos de limpieza, etc., y de si el agua se utiliza en producción (por ejemplo, producción de leche recombinada a partir de leche en polvo, o en producción de zumos).

El suministro de agua a una industria láctea frecuentemente proviene de la red municipal. Este agua se toma de un río o lago y se trata de forma que resulte potable. Las compañías municipales de aguas suministran el agua a la industria láctea a la presión y en la cantidad requerida. El consumo de agua normalmente es medido y registrado. El precio pagado por la industria se calcula entonces por unidad de volumen e incluye una carga adicional como canon de tratamiento que el municipio hace de las aguas residuales.

Muchas industrias lácteas tienen sus propios pozos. Se puede hacer una perforación relativamente poco costosa en aquellos lugares donde el agua subterránea se encuentre cerca de la superficie. A veces las perforaciones tienen que ser más profundas, como se ve en la Figura 6.11.2, para instalar un tubo más largo para alcanzar el nivel subterráneo del agua. El agua es subida a la superficie por medio de una bomba, de tipo sumergible, y se almacena en un depósito que se sitúa normalmente a nivel del terreno, aunque algunas veces se hace a un nivel superior (depósito elevado de agua). Desde aqui el agua se lleva por bombeo o por gravedad hacia los distintos puntos de consumo en la industria láctea.

Tratamiento del agua

El agua se utiliza en muchos puntos en la industria láctea y los requisitos en cuanto a calidad varían con la aplicación en cuestión. Con las técnicas actuales de filtración, descalcificación, intercambio iónico, esterilización, desalinización total y ósmosis inversa es posible obtener agua de una calidad muy alta. Pero el coste también es alto. Es por ello importante definir exactamente la calidad necesaria del agua según sus aplicaciones, de forma que los tratamientos a los que se someta sean los adecuados para cada caso.

Tabla 6.11.1
Especificaciones del agua

	Agua Potable	Agua para productos lácteos
Bacterias coliformes, ufc*/100 ml	<1	0
Bacterias de gelatina/ml	<100	0
Sedimento, mg/l	No	No
Turbidez	No	No
Olor	No	No
Gusto	No	No
Intensidad de color	<20	<10
Materia seca, mg/l	<500	<500
Consumo de permanganato, mg/l	<20	<10
Amonio, mg/l	<0.5	–
Calcio+Manganeso, mg/l	<100	<100
Dureza total como $CaCO_3$, mg/l	–	<100
Hierro, mg/l	<0.2	<0.1
Manganeso, mg/l	–	<0.05
Cobre, mg/l	0	0
Aluminio, mg/l	<0.1	<0.1
Zinc, mg/l	0	0
Bicarbonatos, mg/l	–	<80
Cloruros, mg/l	<100	–
Nitratos, mg/l	<30	–
Nitritos, mg/l	<0.2	–
Fluoruros, mg/l	1	1
Exceso de cloro, mg/l	–	0
Algas, protozoos, etc.	No	No
Materias tóxicas	No	No
pH	7–8.5	7–8.5

* unidades formadoras de colonias.

El agua utilizada en la fabricación de productos lácteos debe ser de la más alta calidad, superando los requisitos de un agua potable normal. Debe ser, por lo tanto, completamente clara, sin olor, color ni sabor, blanda y virtualmente estéril. Su ablandamiento, es decir, la reducción del contenido en calcio y magnesio, y la decloración, es decir, la eliminación del cloro como desinfectante por filtración a través de carbón activo son también necesarias. La Tabla 6.11.1 muestra los requisitos exigidos para el agua potable y para el agua utilizada en los procesos de las industrias lácteas.

El agua que tiene que fluir a través de tuberías y pasos estrechos debe ser ablandada para evitar que éstos se taponen. Toda el agua utilizada para la producción de vapor y alimentación de calderas debe ablandarse con objeto de evitar la formación de depósitos calcáreos sobre las superficies calientes. La formación de incrustaciones de cal en las calderas es indeseable desde el punto de vista económico y de seguridad.

Diseño de la red de tuberías

El agua se distribuye desde la acometida a la fábrica hasta todos los lugares donde se necesita en la industria láctea. El agua circula por una red de tuberías parecida a la utilizada para los productos tratados en la industria. Se utiliza normalmente acero al carbono para las tuberías con un diámetro de 2.5 pulgadas (65 mm) o más, mientras que si se trata de tuberías de menor diámetro se utiliza acero galvanizado. En esta red se dispondrán también válvulas de cierre, manómetros y válvulas de desviación.

Muchos de los procesos de una industria láctea requieren un suministro de agua de especiales características. A veces es necesario suministrar grandes cantidades de agua en un periodo de tiempo relativamente corto, y a una alta presión. Cortos pero intensos períodos de consumo pueden tener lugar en varios puntos simultáneamente. El sistema y la presión de agua deben, por lo tanto, ser apropiados para estas condiciones instantáneas de carga.

Por ejemplo, una industria puede incrementar su producción sin aumentar su demanda de agua de una forma importante. Si esto sucede, y se produce una alta demanda de agua, de forma simultánea y repentina, la presión de suministro puede caer hasta un nivel muy bajo, lo que es peligroso para el correcto funcionamiento de ciertos equipos. Para evitar esto se puede utilizar un tanque pulmón a presión constante. El tanque de presión actúa como un acumulador. Un volumen típico de un tanque de presión es 1-3 m^3. El agua se mantiene en el citado depósito a una presión prefijada, gracias a un colchón de aire. Cuando es necesario, el tanque de presión suministra a los distintos equipos las cantidades necesarias de agua a la presión debida. Cuando la demanda instantánea ha sido satisfecha, el depósito acumula más agua, con objeto de prepararse para la próxima ocasión. La Figura 6.11.3 muestra este tipo de tanque de presión. Durante los tiempos en que no hay demanda, dicho depósito se llena con agua a la presión preestablecida. El interruptor de presión (4) cierra el suministro de potencia a la bomba (6). Tan pronto como el agua sale del depósito, la correspondiente caida de presión originada es registrada por el interruptor de presión, el cual, a través de un contactor, arranca la bomba que envía agua nueva al depósito. Cuando se termina la operación de descarga de agua del depósito se vuelve a bombear agua al mismo hasta que se alcanza el nivel correspondiente a la presión fijada. El interruptor de presión para entonces la bomba y la presión en el tanque está lista para afrontar otra demanda instantánea de agua.

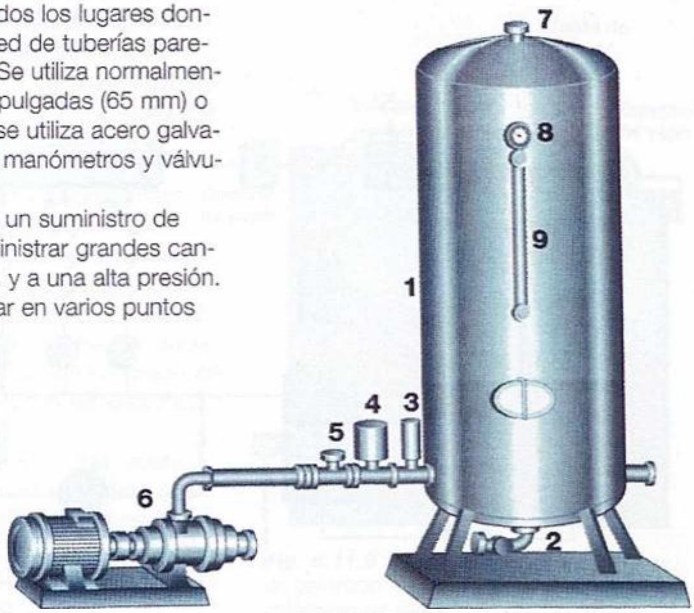


Fig. 6.11.3 *Tanque de presión de agua.*
1. Tanque
2. Válvula de drenaje
3. Válvula de seguridad. Abre a 600kPa
4. Interruptor de presión
5. Válvula antirretorno
6. Bomba de anillo líquido
7. Válvula de purga de aire
8. Indicador de presión
9. Indicador de nivel

Producción de calor

El funcionamiento de una industria láctea requiere grandes cantidades de energía térmica para calentar los distintos productos, soluciones de detergentes, etc. El calor es transferido normalmente al producto en intercambiadores de calor utilizando un fluido caloportador que es el medio de calentamiento. Este fluido o medio se genera en una planta térmica (sala de calderas) y es distribuido a través de una red de tuberías a los distintos puntos de consumo (como el cuerpo de agua caliente del intercambiador de calor que es el pasteurizador). En estos puntos de consumo, el calor se transfiere al producto que se pretende calentar. A continua-

ción el medio de calentamiento retorna de nuevo hacia la planta térmica, donde es vuelto a calentar para retornar una vez más a los puntos de consumo. Este circuito opera de una forma continua.

Como medio de calentamiento se utiliza normalmente vapor a una temperatura de 140-150°C. En algunas industrias lácteas que se han construido recientemente se utiliza, en lugar de vapor, agua caliente como medio de calentamiento. Como la mayoría de los equipos requieren que el agua esté alrededor de 100°C para llevar a cabo el calentamiento, la presión en este sistema debe ser superior a la atmosférica, con objeto de evitar que el agua hierva. El coste de una instalación de agua sobrecalentada es ligeramente inferior al de una instalación de vapor. El sistema es también más fácil de regular y su funcionamiento es más simple. Existe una desventaja, y es que la transferencia de calor en el sistema de agua caliente es inferior a la del vapor.

Producción de vapor

La generación del medio de calentamiento tiene lugar en calderas de vapor o agua caliente, que se encuentran normalmente localizadas en la llamada planta térmica. La caldera se suele alimentar con fuel-oil, carbón o gas. Al quemar el fuel-oil se desprende una energía térmica que es absorbida por el medio de calentamiento. La eficiencia de la calderas suele ser del orden del 80-92% y las pérdidas de calor en la red de distribución pueden a veces alcanzar hasta un 15%. Por lo tanto, sólo entre el 65 y el 77% de la energía térmica total del fuel-oil puede ser utilizada en el proceso productivo. Desde el punto de vista de costes de operación es importante que la eficiencia de la caldera no caiga por debajo del mínimo nivel, por lo que su rendimiento se controla cuidadosamente en las industrias lácteas.

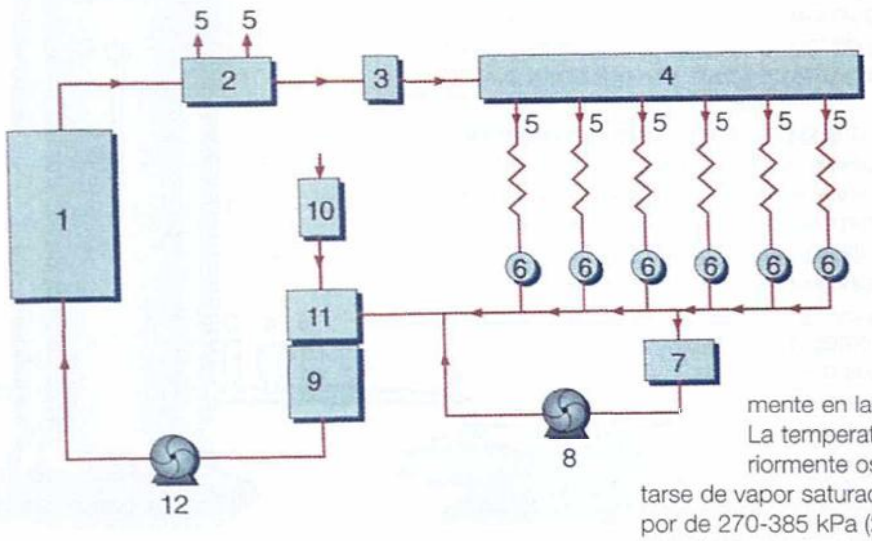


Fig. 6.11.4 *Producción de vapor y sistema de distribución.*
1. *Generador de vapor*
2. *Colector de distribución de vapor a alta presión*
3. *Válvula reductora de presión*
4. *Colector de distribución de vapor a baja presión*
5. *Puntos de consumo*
6. *Purgadores*
7. *Tanque de recogida de condensados.*
8. *Bomba de condensado*
9. *Tanque de agua de alimentación*
10. *Filtro de ablandamiento del agua*
11. *Desgasificación del agua de alimentación*
12. *Bomba de agua de alimentación*

La temperatura del vapor en el sistema descrito anteriormente oscila entre 140 y 150°C. En el caso de tratarse de vapor saturado, esto es equivalente a una presión de vapor de 270-385 kPa (2.7-3.8 bar). Las calderas trabajan a una presión considerablemente mayor, que suele ser de 900-1.100 kPa (9-11 bar), con objeto de reducir el tamaño de las tuberías y compensar las pérdidas de calor y presión en el sistema.

La Figura 6.11.4 muestra un diagrama simplificado del sistema de generación y distribución de vapor. El agua utilizada para la producción de vapor se la conoce como agua de alimentación. Suele contener sales de calcio, que comunican dureza al agua, asi como oxígeno y anhidrido carbónico. Esto hace que en ocasiones sea necesario tratar dicha agua.

Si no se lleva a cabo el citado tratamiento, las sales se depositarán en el sistema y formarán incrustaciones sobre la caldera, lo que supondrá una reducción drástica de su rendimiento. El oxígeno puede causar graves problemas de corrosión en los conductos de agua y vapor. Por ello, es necesaria la inclusión en el sistema de filtros para ablandar el agua (11). Estos filtros eliminan las sales de calcio y magnesio, y los equipos desgasificadores (12) eliminan los gases presentes en el agua de alimentación. Las impurezas que constituyen los fangos se eliminan por medio de un purgado de la caldera. Normalmente es necesario el acondicionado químico del agua de la caldera y el tratamiento del agua de alimentación, para mantener la instalación de vapor en buenas condiciones de operación.

Una bomba de alimentación de agua mantiene el nivel de agua constante dentro de la caldera. Al quemar el fuel-oil en el quemador de la caldera, los gases de combustión desprendidos calientan el agua hasta convertirla en vapor. Se necesita una gran cantidad de calor, alrededor de 2.260 kJ (540 kcal), a presión atmosférica, para convertir un kilogramo de agua en vapor. Este calor, al que se llama calor de vaporización, se liberará cuando el vapor se condense sobre las superficies de transferencia térmica en los puntos de consumo (5).

El vapor condensado, (el condensado), se separa mediante purgadores (6) y un tanque de recogida de condensados (7), y se bombea a la caldera por medio de una bomba de condensados.

Calderas de vapor

Se utilizan dos tipos principales de calderas para la producción de vapor: la caldera pirotubular (que es el tipo más común en las industrias lácteas) y la caldera acuotubular. La selección se ve influenciada por las necesidades de presión de vapor y de cantidad de vapor a utilizar en un tiempo determinado. Las calderas de baja presión y baja potencia son normalmente del tipo pirotubular, en las cuales los gases calientes circulan por el interior de los tubos. Las calderas para altas presiones y fuertes producciones de vapor (altas potencias) se construyen siempre como calderas de tubo de agua (acuotubulares), en las que el agua circula por el interior de los tubos.

La Figura 6.11.5 muestra el principio de funcionamiento de una caldera pirotubular. Los gases calientes son impulsados por un ventilador a través de los tubos. El calor de los gases de combustión se trasmite a través de las paredes de los tubos hasta el agua que rodea la superficie exterior de los tubos. El agua se calienta en la caldera hasta el punto de ebullición. El vapor se recoge en la parte superior de la caldera (bóveda) desde donde parte la red de distribución de vapor.

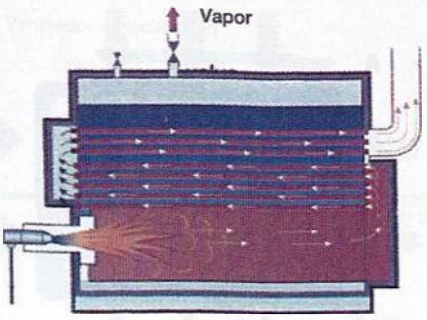


Fig. 6.11.5 *Principio de funcionamiento de un generador de tipo pirotubular.*

Cuando la presión en dicha bóveda alcanza el nivel requerido (preestablecido), la válvula de vapor abre y el vapor fluye hacia los puntos de consumo. El quemador arranca y para de forma automática, manteniendo la presión de vapor al nivel deseado. También se añade agua de alimentación con objeto de mantener el nivel apropiado de agua dentro de la caldera. La válvula de seguridad se abre si la máxima presión permitida es sobrepasada en el interior de la caldera.

Las calderas acuotubulares (de tubos de agua, Figura 6.11.6) se presentan en un gran número de modelos. Su principio de funcionamiento reside en que el agua de alimentación pasa a través de los tubos que están calentados externamente por los gases de combustión. El vapor se produce dentro de los tubos, que están inclinados con objeto de que dicho vapor pueda subir hasta la bóveda. El vapor pasa a las dos bóvedas superiores a través de un sobrecalentador, antes de entrar al sistema de distribución de vapor. El vapor se calienta con los gases de combustión una segunda vez en el sobrecalentador, produciéndose así vapor sobrecalentado. De esta forma se obtiene un vapor más seco.

La bóveda inferior se utiliza para recoger los fangos e impurezas que se encontraban presentes en el agua de alimentación. Dichos sedimentos se eliminan mediante purgado del fondo de la caldera. En otros tipos de calderas los sedimentos se recogen en el fondo de las mismas.

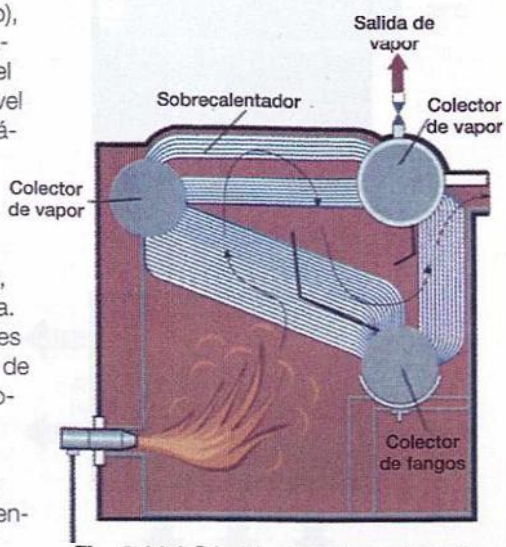


Fig. 6.11.6 *Principio de funcionamiento de un generador de tipo acuotubular, con tres colectores de vapor.*

Separación y retorno de los condensados

El vapor que circula por el sistema de tuberías que constituye la red de distribución se enfría por el ambiente que le rodea y, por lo tanto, comienza a condensarse. Es posible reducir esta condensación aislando las tuberías, aunque la condensación nunca se puede evitar completamente. Por ello, las tuberias se deben instalar con una ligera pendiente o inclinación hacia los puntos donde se eliminan los condensados, localizados en distintas partes de la red de distribución.

En estos puntos se instalan purgadores de vapor. Estos aparatos permiten que pase el condensado (y si es posible también el aire), pero no el vapor. El condensado es separado de la misma forma en los distintos puntos de consumo de vapor, retornándose al tanque de condensados de la planta térmica por medio de bombas de condensados y a través de la red de retorno de condensados. El condensado puede retornar al tanque nodriza de alimentación de agua a la caldera por la propia presión de vapor sin necesidad de utilizar un tanque de condensado ni una bomba para condensados. Este sistema es muy utilizado.

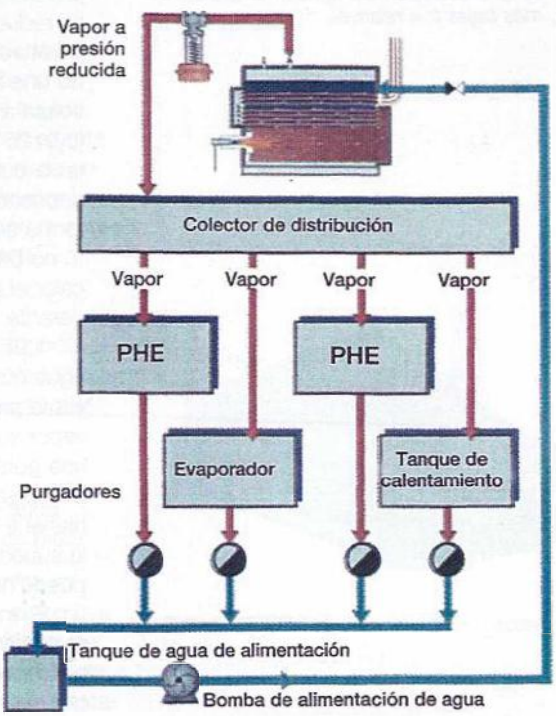


Fig. 6.11.7 *Sistema de distribución de vapor y retorno de condensados*

Otros equipos

El equipo de combustión de las calderas industriales para la producción de vapor consta de un quemador, frecuentemente un quemador de fuel de tipo atomizador, en el cual el fuel-oil se dispersa finamente en forma de neblina. Esta neblina es encendida por electrodos de alto voltaje y los gases de combustión que se obtienen se transportan a través de la caldera por un ventilador. Con objeto de eliminar posibles riesgos de accidentes y malfuncionamientos de la caldera se incluyen también equipos de seguridad. Las modernas calderas para la

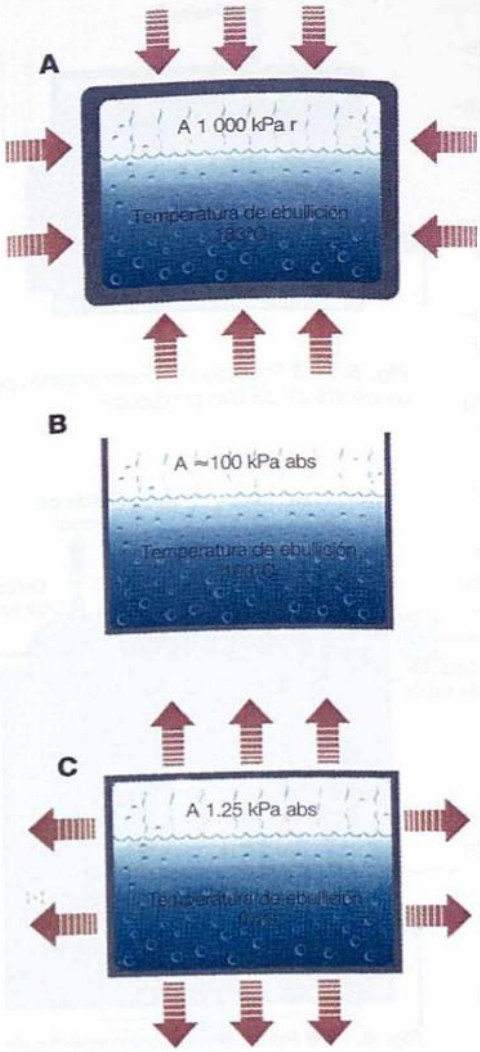


Fig. 6.11.8 *La reducción de presión provoca la ebullición del agua a temperaturas más bajas (r = relativa).*

producción de vapor llevan dispositivos automáticos de control que permiten un funcionamiento de la caldera sin necesidad de una supervisión constante.

La red de distribución de vapor

En la Figura 6.11.7 se muestra esquemáticamente una instalación de vapor donde se puede apreciar la red de distribución de vapor y la red de retorno de condensados. El vapor pasa a través de la válvula principal de la bóveda de la caldera hacia un colector de distribución de vapor a alta presión. Desde aquí se envía el vapor a los equipos que necesitan vapor para su funcionamiento. Con frecuencia, en los puntos de consumo de vapor se instala una válvula reductora de presión, que asegura un ajuste fino de la presión del vapor antes de entrar en el equipo que lo va a consumir.

El sistema de tuberias que se utiliza para la conducción de vapor está expuesto a variaciones fuertes de temperatura. Esto produce expansiones térmicas considerables de las tuberias. Por ello es necesario su instalación de manera que se permitan movimientos axiales de las mismas.

Refrigeración

En muchas etapas del proceso se necesita que el producto se caliente a una temperatura determinada. Un aumento de temperatura producirá también un aumento en la actividad de los microorganismos que puedan encontrarse presentes en el producto, asi como una aceleración de las reacciones químicas controladas por enzimas. Las actividades de este tipo deben ser evitadas en lo posible, por lo que será importante reducir la temperatura del producto tan rápidamente como sea posible, una vez que se haya completado esa etapa de calentamiento del producto. Por lo tanto, las necesidades frigoríficas de las industrias lácteas son relativamente importantes. Los costes de operación de la planta frigorífica de la industria representarán también una partida de cierta consideración.

Principios de la refrigeración

El efecto de refrigeración se basa en el hecho de que cuando un líquido pasa al estado vapor absorbe calor de los alrededores.

Este calor de vaporización ha sido ya citado en la descripción de las calderas de vapor. La presión interna de la caldera es superior a la presión atmosférica y el agua hervirá, por lo tanto, a una temperatura más alta. Por ejemplo, el agua a una presión de 1.000 kPa (10 bar) hervirá a 183°C (Figura 6.11.8.A).

Sin embargo, si se reduce la presión, el agua hervirá a temperaturas más bajas. El agua a presión atmosférica hervirá a 100°C (Figura 6.11.8.B). Si la presión se reduce por debajo de la atmosférica se crea un vacío y el agua hervirá a temperaturas inferiores a 100°C. Se puede hacer que el agua hierva a 80°C conectando una bomba de vacio al recipiente que la contenga y reduciendo la presión absoluta a 50 kPa (0.5 bar). El agua hervirá a 10°C si la presión se reduce a 1.25 kPa (0.0125 bar) (Figura 6.11.8.C). Si el recipiente se coloca en una habitación aislada en la que la temperatura del aire sea de 20°C, el calor del aire pasará al agua en el depósito. Ese agua se convertirá entonces en vapor. Si el vapor formado de esta forma se extrae continuamente de manera que la presión en el interior del depósito no pase de 1.25 kPa, el aire en la habitación se enfriará por la transferencia de calor al agua del citado depósito. En este caso el agua está actuando como *refrigerante.*

1.25 kPa es una presión muy baja y resultaría, por lo tanto, muy caro utilizar agua como refrigerante. Existen otros líquidos que, a la misma temperatura, hierven a presiones considerablemente más altas. Esos líquidos tienen una presión de vapor superior a la del agua. Un ejemplo de este tipo de productos es el éter. Si una gota de éter cae sobre nuestra piel, vemos cómo ésta se enfría. El calor de la piel pasa al éter líquido, que lo utiliza para hervir y convertirse en vapor. El éter hierve a una temperatura inferior a 37°C a la presión atmosférica. Si la presión en la superficie del líquido es reducida por una bomba de vacío, este tipo de líquidos puede hervir a temperaturas muy por debajo de 0°C.

El amoníaco es un refrigerante muy utilizado en la práctica. Hierve a la presión atmosférica a una temperatura de -33°C. Reduciendo la presión a 50 kPa (0.5 bar), el amoníaco hervirá a -45°C. El Freón R22 es otro refrigerante muy utilizado que, al contrario que el amoníaco, no es tóxico y no huele, y, además, tampoco arde o explota. Como refrigerante tiene aproximadamente la misma presión de vapor que el amoníaco a diversas temperaturas.

El uso de los refrigerantes R12 y R22 está actualmente restringiéndose en muchos paises debido a sus efectos nocivos sobre la capa de ozono. Estos refrigerantes son básicamente CFCs (clorofluorados). El cloro es el que produce el deterioro de la capa de ozono. Además, los CFCs contribuyen al aumento del efecto invernadero. En la selección de un refrigerante para un determinado sistema frigorífico es aconsejable reemplazar los refrigerantes CFCs por otros que sean aceptables desde el punto de vista medioambiental y legal.

¿Cómo trabaja el sistema frigorífico?

El sistema frigorífico es un circuito cerrado en el que el refrigerante pasa cíclicamente del estado gaseoso al liquido sufriendo cambios alternativos de presión: aumentos de presión (compresión, para pasar del estado gas a líquido) y reducciones de presión (expansión, para pasar del estado líquido a gas). Los componentes principales de un sistema frigorífico son:

- evaporador;.
- compresor,
- condensador,
- válvula de expansión.

La Figura 6.11.9 muestra como funciona una instalación frigorífica o sistema frigorífico. El refrigerante se encuentra bajo la acción de una baja presión en el evaporador. De esta forma absorbe calor del espacio que le rodea. Esto hace que parte del refrigerante se esté evaporando continuamente. El vapor se extrae de forma contínua del evaporador por medio del compresor, que es el que mantiene la presión del refrigerante y su temperatura de vaporización en un nivel constante.

El refrigerante vaporizado es comprimido hasta una mayor nivel de presión en el compresor. De esta forma, el gas refrigerante comprimido y sobrecalentado, pasa del compresor hasta el condensador para su enfriamiento. Las temperaturas de vaporización y condensación aumentarán como consecuencia de haberse incrementado la presión del vapor refrigerante. Cuando se utiliza amoníaco, una temperatura de vaporización de trabajo puede ser -20°C, que se corresponde con una presión absoluta de vaporización de 200 kPa (2 bar).

La presión del vapor producido en el evaporador se aumenta hasta unos 1.000 kPa (10 bar) en el compresor. Esto se corresponde con una temperatura de condensación de +25°C. Entonces, el gas amoniáco condensará, es decir, pasará de vapor a líquido. Esto tiene lugar en el condensador mediante enfriamiento del gas con agua o aire. El calor absorbido por el amoniaco en el evaporador es disipado en el condensador.

El amoniaco líquido condensado debe entonces volver desde el condensador al evaporador. El líquido pasa a través de la válvula de expansión, con objeto de disminuir la presión. De esta forma se reduce también la temperatura del líquido. La válvula de expansión se regula de forma que se obtenga una reducción exacta de la presión (con objeto de que el líquido alcance la misma presión que reina en el evaporador). Una pequeña proporción del líquido se vaporiza a su paso por la válvula de expansión cuando se reduce la presión. El calor de vaporización que se necesita para esto se obtiene del liquido, que, como consecuencia, se enfria.

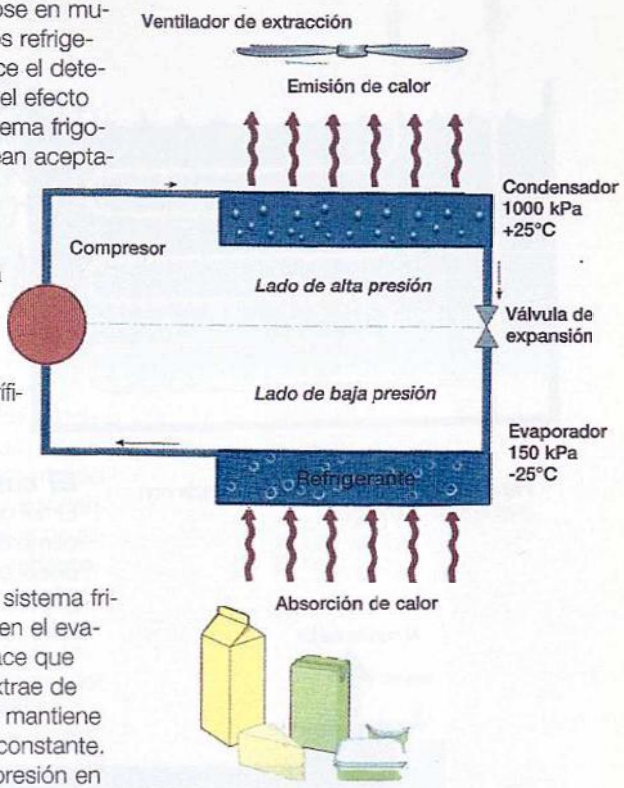


Fig. 6.11.9 *Representación esquemática de un sistema frigorífico con amoníaco como refrigerante.*

El evaporador

El evaporador es el componente de la planta de refrigeración (o sistema frigorífico) en el que se produce la vaporización del refrigerante. El diseño del evaporador viene determinado por el tipo de refrigerante escogido. En la industria láctea se pueden presentar tres tipos de evaporadores:

- evaporadores de enfriamiento de aire
- evaporadores de carcasa y tubos, y de placas, para enfriamiento de agua
- evaporadores enfriadores de agua, de inmersión, para acumulación de hielo.

En los evaporadores enfriadores de aire (Figura 6.11.10), el aire se enfría haciéndolo pasar a través de una batería de tubos dotados de aletas para maximizar la superficie de transferencia de calor. El refrigerante que circula por el interior de los tubos absorbe el calor del aire y se evapora. Los evaporadores enfriadores de aire se utilizan para la refrigeración de áreas de almacenamiento y del aire en instalaciones de aire acondicionado.

Los evaporadores enfriadores de agua, que son intercambiadores de calor de carcasa y tubos o de placas, se utilizan ampliamente en las industrias lácteas.

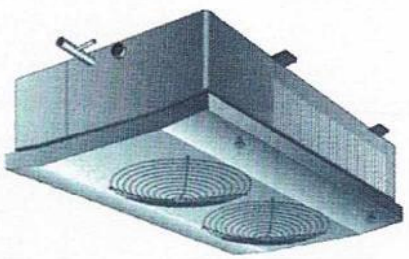


Fig. 6.11.10 *Pequeña unidad enfriadora de aire.*

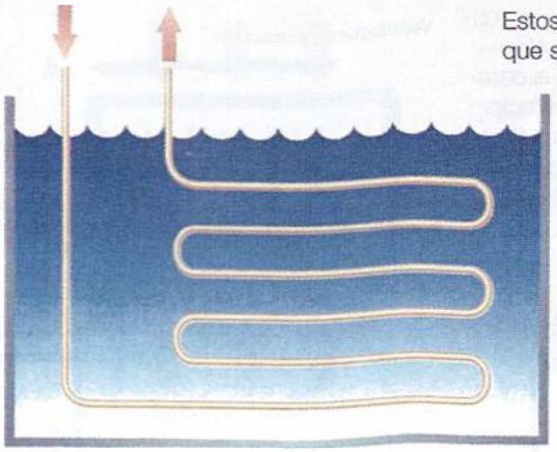


Fig. 6.11.11 *Tanque de agua helada con evaporador sumergido.*

Estos evaporadores tienen la función de extraer el calor del medio de refrigeración que se utiliza para enfriar leche o productos lácteos en intercambiadores de calor.

El refrigerante o medio de enfriamiento utilizado para enfriamiento del producto es normalmente agua helada, salmuera (agua+sal) o agua con anticongelante (etanol o glicol), que permite reducir el punto de congelación a temperaturas inferiores a 0ºC.

El evaporador de inmersión (Figura 6.11.11) que se utiliza para acumulación de hielo se diseña para su colocación en un depósito con agua (tanque acumulador), con objeto de producir agua helada. Durante la noche, el agua se congela formando una capa alrededor de los tubos del evaporador, por cuyo interior circula el refrigerante. Esto permite utilizar energía eléctrica barata para el funcionamiento de la planta de enfriamiento. El hielo funde durante el día, permitiendo disponer de una gran capacidad de refrigeración procedente de este "banco de hielo" en la forma de agua helada.

El compresor

El refrigerante en estado vapor es comprimido hasta una presión elevada en el compresor. Esto incrementa la temperatura del vapor. El trabajo llevado a cabo por el compresor es transmitido al gas en forma de calor. Esto quiere decir que el gas que sale del compresor contiene una mayor cantidad de calor que el que fue absorbido en el evaporador. Todo ese calor debe ser eliminado por enfriamiento en el condensador.

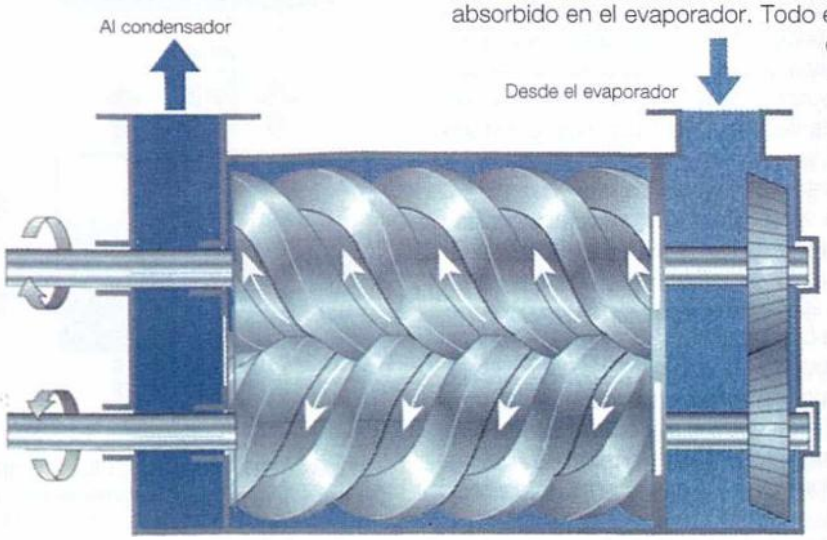


Fig. 6.11.12 *Principio de diseño de un compresor de tornillo.*

El compresor frigrífico más utilizado actualmente es el compresor alternativo o de pistón. Los gases pasan a los cilindros y son comprimidos por los pistones en dichos cilindros, cuyo número puede ser variabte según el tipo y tamaño del compresor. Se fabrican para capacidades frigoríficas comprendidas entre 0.1 y 400 kW.

El compresor de tornillo (Figura 6.11.12) es también muy común actualmente sobre todo para capacidades frigoríficas elevadas. Los principales componentes son dos rotores helicoidales, instalados dentro de un cuerpo común. Al girar los rotores, el gas penetra en los espacios existentes entre los dientes de los rotores (ver también el epígrafe Bombas de desplazamiento positivo, del capítulo 6.7), quedando atrapado entre los rotores. El volumen entre los dientes se reduce progresivamente a medida que el gas es transportado a lo largo de los rotores. Graduatmente, el gas se comprime, aumentando su presión. El vapor comprimido continúa después hacia el condensador. Se suele atomizar aceite sobre las caras de los rotores en la mayoría de estos compresores, con objeto de reducir las fugas entre los huecos de los rotores. De esta forma se obtiene una rendimiento volumétrico elevado incluso a bajas velocidades. El aceite se separa de los vapores en un separador de aceite situado antes del condensador.

Los compresores de tornillo se utilizan en grandes instalaciones. Una de las mayores ventajas de este tipo de compresores es que su capacidad se puede reducir hasta un 10% de su potencia total sin excesivas pérdidas de potencia eléctrica.

El condensador

El calor absorbido en el evaporador y el calor transmitido al vapor en el compresor se eliminan por enfriamiento en el condensador. Los condensadores se dividen en tres tipos:

- condensadores enfriados por aire
- condensadores enfriados por agua
- condensadores evaporativos.

La selección del condensador viene determinada por factores externos tales como las disponibilidades de agua, el precio de ésta y el tiempo de trabajo de la instalación.

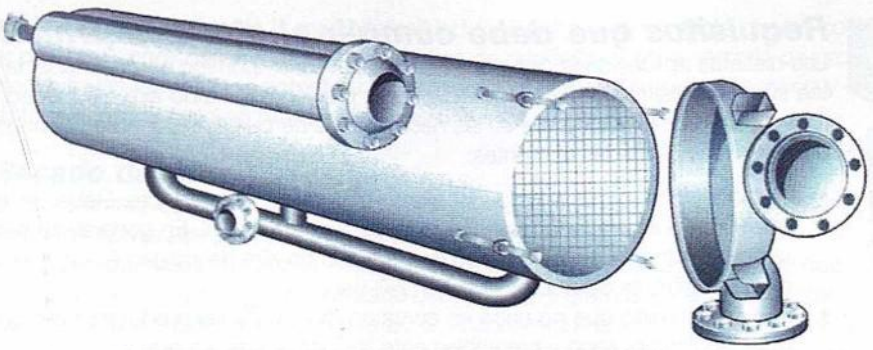


Fig. 6.11.13 *Condensador de carcasa y tubos con un extremo abierto.*

Los condensadores enfriados por aire, hasta ahora, han sido utilizados principalmente en pequeñas plantas de refrigeración, pero se emplean cada vez más en instalaciones más o menos grandes. La razón de ésto es el rápido incremento del coste del agua y, ocasionalmente, la inseguridad en su suministro. En los condensadores enfriados por aire, el refrigerante pasa por el interior de una bateria de tubos aleteados, alrededor de los cuales circula el aire de enfriamiento. Al enfriarse, el refrigerante se condensa en el interior de los tubos y fluye hacia la válvula de estrangulamiento.

Los condensadores enfriados por agua son los más económicos cuando se dispone de un suministro barato de la misma. El más corriente es el condensador de carcasa y tubos (multitubular horizontal), que aparece en la Figura 6.11.13. Funciona por circulación del agua de enfriamiento por el interior de los tubos. Ello hace que el refrigerante se condense en la superficie externa de dichos tubos.

El condensador enfriado por agua se combina en muchos casos con torres de enfriamiento, como la que aparece en la Figura 6.11.14. El agua se enfría por aire en la citada torre y se bombea al condensador, donde absorbe el calor de condensación procedente del refrigerante. Desde aquí, de nuevo se bombea a la torre de enfriamiento para repetir el ciclo.

El condensador evaporativo es una combinación del condensador enfriado por aire y de la torre de enfriamiento. Se utiliza cuando se dispone de poca cantidad de agua de enfriamiento o cuando el coste del agua es demasiado alto.

Otros equipos

La instalación descrita ha sido simplificada de forma importante con objeto de ilustrar cómo trabajan las plantas de refrigeración. Se necesitan otros muchos componentes para que la planta funcione, tales como depósitos para el refrigerante, filtros, separadores de aceite, válvulas de seguridad, válvulas de cierre, indicadores de nivel, manómetros, termómetros y otros equipos de seguridad que harán que el sistema frigorífico funcione correctamente. La instalación puede equiparse también con dispositivos automáticos de control, que eliminan la necesidad de una constante supervisión y que suponen una reducción en los costes de operación.

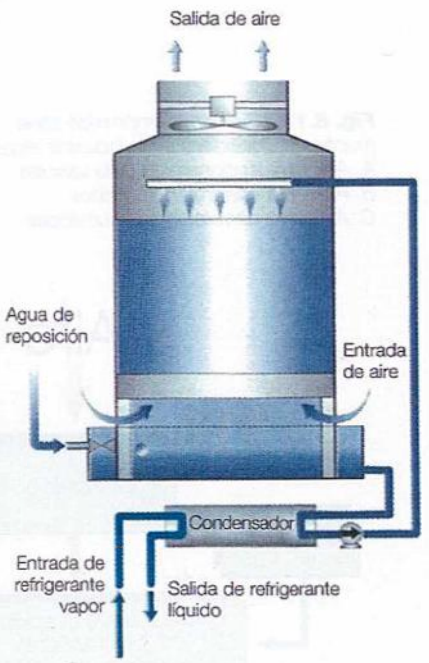


Fig. 6.11.14 *Condensador de carcasa y tubos combinado con torre de enfriamiento.*

Producción de aire comprimido

En las industrias lácteas se tiene una gran demanda de equipos e instrumentos avanzados para el control automático, monitorización y regulación de los distintos procesos de producción. Los sistemas automáticos controlados neumáticamente han demostrado ser seguros en el ambiente húmedo de las industrias lácteas, por lo que se utilizan con gran frecuencia. Para tener una fiabilidad de funcionamiento de dichos sistemas se necesita aire comprimido libre de impurezas, lo que supone que el diseño de los sistemas de aire comprimido debe ser cuidadoso. El aire comprimido tiene también otras aplicaciones:

- Suministra la potencia necesaria en los actuadores de algunas máquinas, tales como las llenadoras,
- Vaciado del producto contenido en las tuberías,
- Agitación en depósitos de almacenamiento.
- Accionamiento de herramientas en el taller.

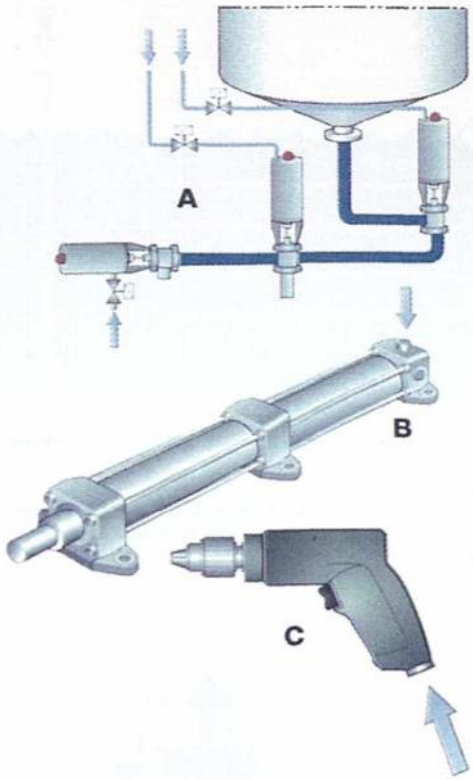


Fig. 6.11.15 *El aire comprimido tiene muchas aplicaciones en la industria láctea.*
A. Aire para accionamiento de válvulas
B. Aire para cilindros neumáticos
C. Aire para herramientas neumáticas

Requisitos que debe cumplir el aire comprimido

Las distintas aplicaciones que puede tener el aire comprimido en una industria láctea suponen distintos requisitos en cuanto a presión del citado aire, sequedad, pureza y cantidad. Basándonos en las necesidades de pureza, el aire comprimido se divide en tres calidades diferentes:

- Aire comprimido que entra en contacto directo con el producto. Debe ser limpio, libre de aceite, seco, sin olor y prácticamente estéril. En general, se necesita relativamente poca cantidad de este tipo de aire de calidad A. La presión de suministro es de 200 a 300 kPa (2-3 bar).
- Aire comprimido que no entra en contacto directo con el producto, pero que debe ser limpio, seco y preferiblemente libre de aceite, ya que se utiliza en instrumentos de control y como fuente de fuerza para activar componentes y válvulas neumáticas, etc. Este aire comprimido se suministra a una presión comprendida entre 500 y 600 kPa (5-6 bar).
- Aire comprimido que debe estar preferiblemente libre de partículas sólidas y tan seco como sea posible, ya que se utiliza en herramientas neumáticas, etc. La presión de suministro es de aproximadamente 600 kPa (6 bar).

El aire no tratado procedente de la atmósfera tiene siempre diferentes tipos de impurezas. Esas impurezas aparecen también en el aire comprimido sin tratamiento, junto con las impurezas incorporadas por el compresor. Algunas partículas proceden del desgaste del compresor y del aceite utilizado. El aire procedente de la atmósfera contiene también vapor de agua, que debe ser eliminado si se quiere que el aire comprimido cumpla los requisitos normalizados de calidad.

En las industrias lácteas, las mayores cantidades de aire comprimido se utilizan en las máquinas neumáticas y en los talleres. Este aire debe suministrarse a una presión de aproximadamente 600 kPa (6 par), para lo que se necesita una instalación de compresión con una presión de trabajo de 700 kPa (7 bar), con objeto de compensar la pérdida de presión en la línea de distribución del aire comprimido. Sólo es necesaria una pequeña cantidad de aire comprimido a presiones inferiores a las que se necesitan para el control de instrumentos y como fuente de potencia. Sería, por lo tanto, antieconómica la utilización de compresores separados para este tipo de aire, ya que requeriría también una red separada de conducciones de distribución. Por ello, el aire comprimido necesario para las distintas aplicaciones se toma de una instalación central de aire comprimido, recibiendo posteriormente un tratamiento individual con objeto de cumplir las especificaciones necesarias en cada caso.

Instalación de aire comprimido

El aire comprimido se produce en un compresor de aire. Cuando dicho aire debe estar libre de la presencia de aceite no es posible la utilización de compresores cuyos cilindros están lubricados con objeto de aumentar la eficacia de compresión. Se deben utilizar compresores libres de aceite. Es prácticamente imposible eliminar todo el aceite presente en el aire comprimido, pero, sin embargo, es posible llegar a un contenido residual de aceite de sólo 0.01 ppm.

En las industrias lácteas es normal la utilización de dos compresores idénticos para cubrir sus necesidades globales de aire comprimido. Los tipos de compresores utilizados incluyen compresores lubricados con aceite, compresores de tornillo con cámaras de compresión libres de aceite, compresores de pistones especiales con cilindros no lubricados y con medios para evitar que el aceite del cigüeñal penetre en la cámara de compresión, y, finalmente, se utilizan también los llamados turbocompresores.

La Figura 6.11.16 muestra un ejemplo de una instalación. El aire se suministra desde el compresor a un deshumidificador, donde el vapor de agua que existe en el aire se elimina por medio de enfriamiento y precipitación. Una vez secado, el aire continúa hasta un receptor de aire. El aire comprimido se toma de este depósito y se utiliza en instrumentos de control, en el accionamiento de válvulas y en el suministro de potencia a cilindros de accionamiento, etc.

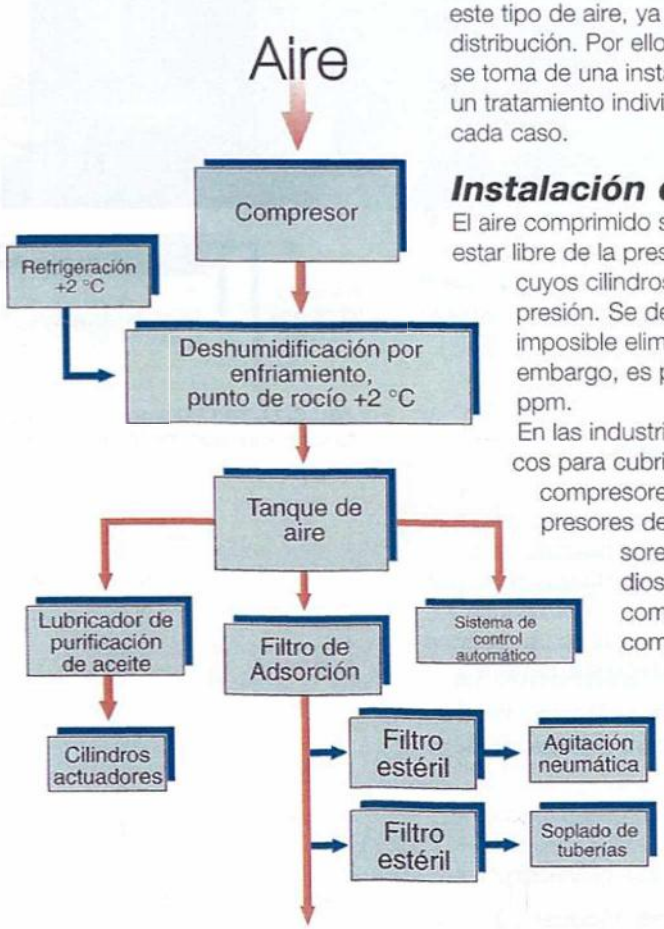


Fig. 6.11.16 *Instalación de aire comprimido.*

El aire comprimido de la más alta calidad, que entrará en contacto directo con el producto, como en la agitación neumática de depósitos y en el vaciado de producto de las tuberías, se somete a un secado posterior en filtros de absorción y es entonces esterilizado en filtros especiales antes de su utilización.

Secado del aire

El aire siempre contiene vapor de agua. La cantidad más alta de vapor de agua (en g/m³) que el aire puede contener varía con la temperatura.

El aire que contiene la mayor cantidad posible de vapor de agua se dice que está saturado. A 30°C, el aire saturado contiene 30.1 gramos de agua por metro cúbico. Si la temperatura baja hasta 20°C, el contenido de vapor saturado es sólo de 17.1 g/m³. Esto quiere decir que 30.1-17.1 = 13.0 g/m³ precipitará (se condensará) como agua libre. La temperatura a la que el vapor de agua comienza a condensarse se llama punto de rocío.

El aire en la atmósfera, a una temperatura de 20°C, contiene un máximo de 17.1 g/m³ de agua. El grado de sequedad de un aire que contiene sólo 6.8 g/m³ de agua puede ser descrito por su "humedad relativa", HR, es decir, por la relación entre el contenido real de agua y el máximo posible. La humedad relativa del aire en este caso será de

$$\frac{6.8 \times 100}{17.1} = 40\%$$

El punto de rocío para este aire es de 5°C. El vapor comenzará a condensarse en forma de agua libre cuando se enfríe por debajo de 5°C.

Si el aire de la atmósfera, que se encuentra a una presión de 100 kPA (1 bar), se comprime hasta alcanzar la mitad de su volumen, sin cambio en su temperatura, la presión aumentará a 200 kPa (2 bar). Un metro cúbico de este aire a esta presión superior contendrá 2 x 6.8 = 13.6 g agua/m³. Su punto de rocío tambien aumentará desde 5 a 16°C, como consecuencia de haber sido comprimido.

Si este aire se vuelve a comprimir nuevamente hasta la mitad de su volumen, la presión pasará a 400 kPa (4 bar). Un metro cúbico de este aire comprimido contendrá 2 x 13.6 = 27.2 g agua/m³. Sin embargo, el aire a 20°C puede contener solamente 17.1 g/m³ de agua, independientemente de su presión. El exceso de 27.2 - 17.1 = 10.1 g/m³ condensará en la forma de agua libre durante la compresión.

A la inversa, es posible reducir el punto de rocío del aire si se le permite que se expansione hasta una presión baja (mayor volumen).

El aire que ha sido comprimido en un compresor (Figura 6.11.16 ref. 1) contiene una gran cantidad de agua. También se calienta (a 140-150°C, aproximadamente), por lo que debe ser enfriado. Para ello pasa por un enfriador, donde la mayoría de agua precipita mediante el enfriamiento con agua o aire. El aire comprimido continúa entonces hacia un enfriador-secador (ref. 2), donde tiene lugar un nuevo enfriamiento hasta alcanzar el punto de rocío alrededor de 2°C. El aire seco tendrá ahora una presión de 700 kPa (7 bar), una temperatura de 2°C y un contenido en agua de 5.6 g/m³.

En una industria láctea es preciso que al aire comprimido posea un punto de rocío que esté al menos 10°C por debajo de la menor temperatura ambiente a la que se someterá dicho aire comprimido en las líneas de distribución.

Un punto de rocío de 2°C se considera satisfactorio en la mayor parte de los casos. Si la red de distribución de aire comprimido atraviesa zonas con temperaturas por debajo de 0°C, el aire tendrá que ser secado a un punto de rocío inferior, con objeto de evitar condensaciones de agua dentro de las líneas de aire, lo que originaría problemas. En tales casos, es necesaria la utilización de secadores de absorción (ref. 4). La humedad presente en el aire es absorbida por un agente desecante, tal como gel de sílice.

El aire estéril se obtiene por filtración del aire comprimido a través de filtros estériles (ref. 5). Estos filtros constan de elementos filtrantes de algodón químicamente puro o poliester o polipropileno. Los microorganismos mueren cuando el aire se calienta en el compresor. Las reinfecciones se pueden producir en las tuberías, por lo que los filtros estériles se colocan inmediatamente antes del equipo donde dicho aire va a ser utilizado. Los filtros normalmente están adaptados a la esterilización con vapor.

Red de tuberías de distribución

La solución más racional es disponer de una sola planta de compresión y una sola red de distribución del aire comprimido. En las modernas industrias lácteas, altamente automatizadas, es de la mayor importancia disponer de aire comprimido a las presiones y cantidades necesarias para el suministro a los instrumentos y sistemas de control. En algunos casos, el diseño debe implicar la instalación de reguladores que abastecen de aire comprimido al sistema de control, de forma que el suministro de aire a puntos menos importantes puede cortarse si se ve que existe una tendencia a la caída de presión en la línea.

Potencia eléctrica

Normalmente, las industrias lácteas compran la energía eléctrica que necesitan de las compañías distribuidoras locales. En muchos casos se abastecen en alta tensión, entre 3.000 y 20.000 V, pero las industrias con una demanda de hasta aproximadamente 300 kW pueden también abastecerse en baja tensión, a 200-400 V.

Los principales componentes de una instalación eléctrica son:

- Instalación de acometida en alta tensión
- Transformadores de potencia
- Cuadro general de distribución en baja tensión
- Grupo autogenerador
- Cuadros secundarios de fuerza (CSF)

Instalación de acometida en alta tensión

La instalación de acometida en alta tensión constituye la instalación principal de entrada en alta tensión.

La instalación de acometida consta de una serie de celdas. Una o más celdas se destinan a la instalación de la línea de acometida del suministrador. Cada celda de acometida tendrá su interruptor para aislamiento. Además de las celdas de acometida se tiene una celda donde se instala el equipo de medida (en alta tensión) de la energía eléctrica consumida. A continuación de la celda de medida se tendrán las celdas de abastecimiento, una por transformador de suministro. Una industria láctea normal tiene entre uno y cuatro transformadores. Cada transformador estará protegido por un interruptor (interruptor de corte y fusibles) que corta la potencia en caso de fallo o sobrecarga.

Si la industria tiene un número importante de motores, por ejemplo 300 kW o incluso más, puede ser interesante funcionar a alta tensión a partir de celdas separadas de abastecimiento.

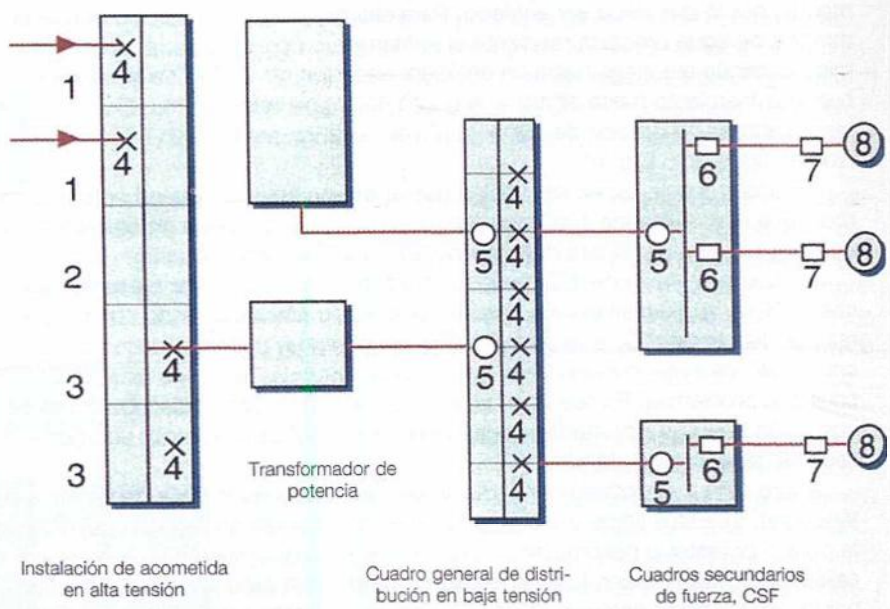


Fig. 6.11.17 *Ejemplo de un sistema de distribución de potencia para una industria láctea.*
1. Celda de acometida
2. Celda de equipos de medida
3. Celda de conexión a transformador
4. Interruptores
5. interruptor general
6. Sistema de arranque de motor
7. Interruptor de aislamiento
8. Punto de consumo (motor)

Transformador de potencia

El transformador de potencia recibe la potencia de la línea de acometida en alta tensión. El transformador de potencia convierte la alta tensión en baja tensión, normalmente entre 200 y 440 V. El tamaño del transformador depende de la demanda de potencia. La capacidad normal oscila entre 400 y 2000 kVA.

Se tienen dos tipos principales de transformador:

- El tipo aislado con aceite para instalación interior o exterior,
- El tipo aislado en seco para instalación interior.

Los transformadores aislados con aceite son menos caros, pero requieren una celda separada con protección contra incendios debido a que el aceite es inflamable. La celda ha de tener un canal bajo el transformador para recogida de las fugas de aceite.

Los transformadores aislados en seco no contienen aceite inflamable y pueden por tanto ser instalados en contacto con la carga. Los transformadores tienen unas pérdidas de aproximadamente 1 kW por cada 100 kVA. Esta pérdida de energía se disipa como calor, y se debe eliminar con una adecuada ventilación.

Cuadro general de distribución en baja tensión

Este cuadro recibe la potencia de los cables o barras que lo conectan al transformador de potencia. El cuadro general de distribución en baja tensión es el cuadro principal que suministrará en baja tensión a toda la industria. Contiene equipo de corte, control y protección de las líneas de abastecimiento.

El tamaño del transformador de potencia determinará lo grande que será el interruptor general y las protecciones generales a instalar en el cuadro general de distribución.

Este cuadro contiene:

- Una línea de entrada con un interruptor general para aislamiento del cuadro y los instrumentos de control de voltaje, intensidad, etc.
- Varias líneas de salida hacia los distintos centros de consumo de potencia, como los cuadros secundarios de fuerza, los homogeneizadores, etc. Cada línea tendrá un interruptor de corte y fusible para la protección de cables y motores.
- Una unidad con el equipo de corrección del factor de potencia (aunque no siempre).

Grupo autogenerador

Se puede utilizar un grupo autogenerador para una producción local, en la propia fábrica, de energía eléctrica. Este grupo puede funcionar de manera continua o utilizarse sólo si hay un fallo de suministro de las compañías eléctricas. El generador normalmente es un motor diesel, que tiene integrados sus propios cuadros de control, y proporciona un suministro a baja tensión. Si fuera necesario se pueden instalar varios grupos funcionando en paralelo.

Cuadros secundarios de fuerza, CSF

Los cuadros CSF reciben la potencia mediante cables que los conectan al cuadro general de distribución en baja tensión. Los cuadros CSF controlan, protegen y distribuyen la potencia a los puntos finales de consumo en la planta de proceso.

Un cuadro CSF contiene una línea de entrada con su interruptor general para aislamiento y las líneas de salida de suministro a las máquinas y motores. Los tipos más comunes de suministro son:

- Interruptores (o fusibles) de una o tres fases
- Sistemas de arranque de motores para arranque directo en estrella
- Sistemas de arranque de motores para arranque en estrella-triángulo
- Sistemas de arranque con dos velocidades

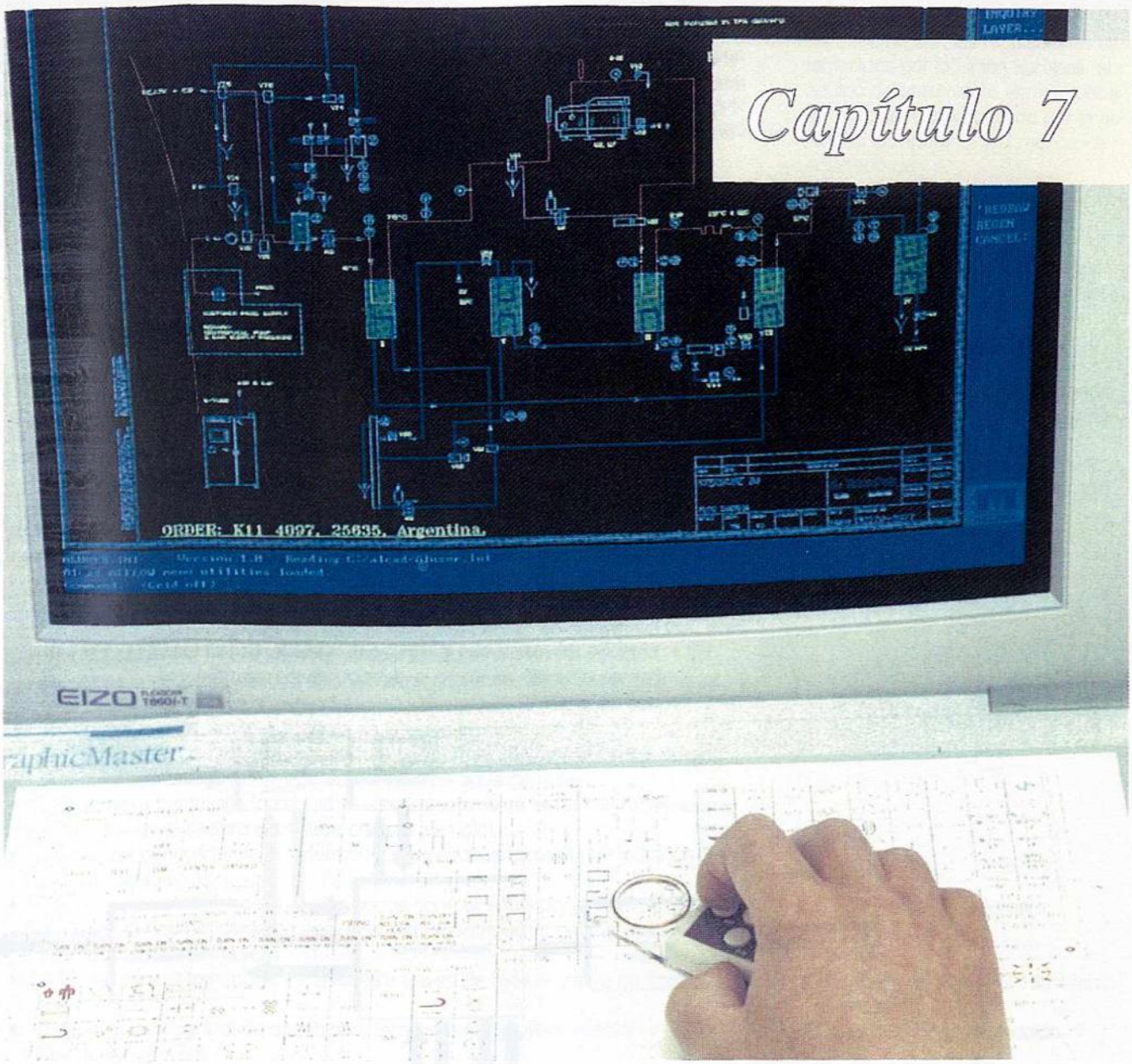
Normalmente, desde un cuadro CSF se derivan varios puntos de conexión. Algunas máquinas tienen su propio Panel de Control o Cuadro Secundario de Fuerza con todo el equipo necesario.

Los Cuadros Secundarios de Fuerza se pueden controlar:

- Manualmente mediante botones de accionamiento dispuestos sobre la puerta del cuadro,
- Manualmente mediante botones de accionamiento dispuestos en paneles localizados en las áreas de proceso,
- Mediante sistemas electrónicos de control colocados en cada CSF o en una sala de control central.

Las máquinas individuales y los motores reciben la potencia mediante cables que los conectan a los CSF. El tendido de los cables se realiza normalmente sobre bandejas o en tuberías. Cerca de cada motor se instala un interruptor de aislamiento (interruptor de seguridad) para su uso durante el mantenimiento.

Todo el material eléctrico que se utilice ha de tener una protección adecuada (IP = International Protection classification) frente al contacto con objetos sólidos y entrada de agua, dependiendo del local (ambiente) en el que se instale. Las normas internacionales sirven como ayuda en la realización de esta clasificación. Normalmente se exige la protección IP 54 dentro de las áreas de proceso y envasado.



Capítulo 7

Diseño de una línea de proceso

En la industria láctea la leche cruda pasa a través de varias etapas de tratamiento en distintos tipos de equipo de proceso antes de llegar al consumidor como producto acabado. La producción normalmente tiene lugar de forma continua en un proceso cerrado, donde los componentes principales están interconectados mediante un sistema de tuberías. El tipo de tratamiento implicado y el diseño del proceso depende del tipo de producto final que se va a obtener.

El proceso descrito en este capítulo es el de pasteurización general de la leche. Este proceso es el más importante en el procesado de leche líquida, y tam-

bién constituye una etapa importante de pretratamiento en una determinada línea de proceso en cualquier industria láctea, como en la fabricación de queso y otros productos lácteos fermentados. El objetivo es presentar algunas de las consideraciones que debe tener en cuenta el diseñador cuando se plantea una instalación completa de pasteurización de leche.

Consideraciones sobre el diseño de procesos

Hay muchos aspectos a considerar cuando se va a diseñar una nueva línea de proceso. Estos aspectos pueden ser diversos y muy complejos, lo que supone una gran responsabilidad para los encargados del planteamiento preliminar. La ingeniería del proyecto siempre supone un compromiso entre diferentes necesidades:

- Relativas al producto. Se refieren a la materia prima, su tratamiento y la calidad del producto final;
- Relativas al proceso. Se refieren a la capacidad de la planta de proceso, selección de los componentes y su compatibilidad, grado de control del proceso, disponibilidad de fluidos de calentamiento y enfriamiento, limpieza de los equipos de proceso, etc.;
- Económicas. Se refieren a que el coste total de producción, consiguiendo los niveles de calidad estipulados, sea el más bajo posible.
- Legales. Se refieren a que la legislación establece muchas veces los parámetros de proceso así como la elección de los componentes y las soluciones del sistema.

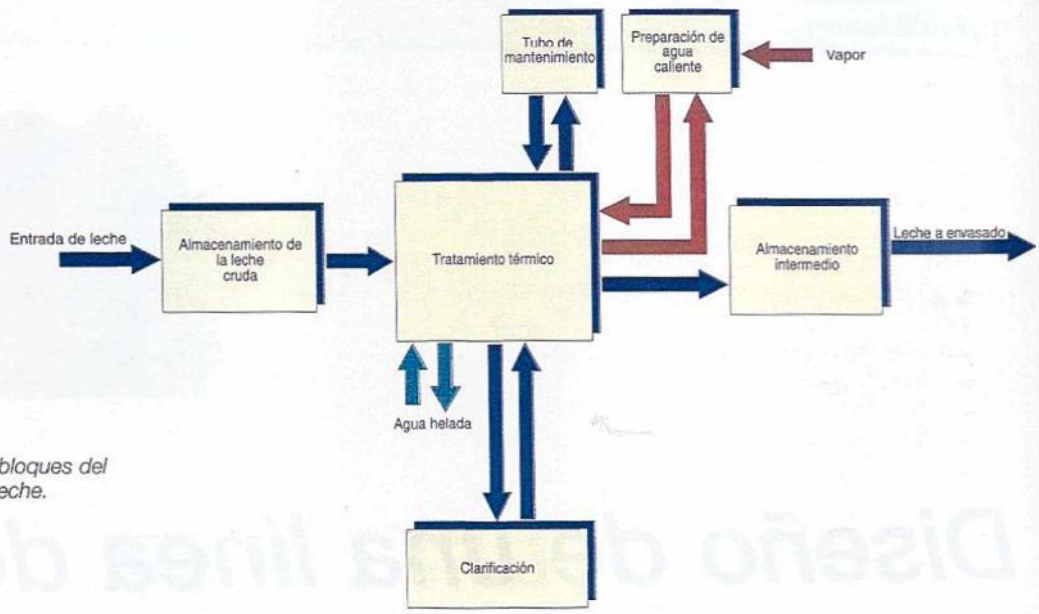


Fig. 7.1 *Diagrama general de bloques del proceso de pasteurización de leche.*

El proceso ilustrado en la Figura 7.1 analiza el tratamiento térmico-pasteurización de leche entera, como el que se lleva a cabo en el tratamiento de leche líquida comercial.

Algunas exigencias legales

En muchos paises donde la leche se procesa para obtener diferentes productos, ciertas exigencias vienen establecidas por las leyes para proteger a los consumidores frente a la infección por microorganismos patógenos. El texto y las recomendaciones pueden variar, pero la combinación que se indica a continuación cubre la mayor parte de las exigencias normalmente establecidas:

- **Tratamiento térmico**

La leche debe tratarse térmicamente de tal manera que sean destruidos todos los microorganismos patógenos. Se debe conseguir una combinación mínima tiempo/temperatura de 15 segundos a 72°C.

- **Registro**

La temperatura de calentamiento se debe registrar de forma automática y almacenarse lo registrado en cada tratamiento durante un período de tiempo establecido.

- **Clarificación anterior al tratamiento térmico**

Como la leche a menudo contiene materias sólidas como partículas de polvo, leucocitos (corpúsculos blancos de la sangre) y células somáticas (del tejido de la ubre), se debe clarificar. Debido a que la pasteurización es menos efectiva si las bacterias están incrustadas en las partículas en suspensión que pueda tener la leche, la clarificación ha de tener lugar antes del calentamiento. La leche se puede clarificar en un filtro, o, más efectivamente, en una clarificadora centrífuga.

- **Prevención de la reinfección**

Los intercambiadores de calor se calculan de forma que se mantenga una presión más alta en el lado de la leche ya pasteurizada que en el lado de leche cruda y en el lado de flujo de los fluidos caloportadores. Si se produce una fuga en el intercambiador de calor, la leche pasteurizada debe fluir hacia el lado de la leche no pasteurizada o hacia el lado de flujo de los fluidos caloportadores, y no en dirección contraria. Con el fin de garantizar lo que se ha indicado anteriormente en ciertos paises se recomienda (y en otros paises es una norma de obligado cumplimiento) que la bomba de impulsión de la leche genere esa presión diferencial.

En el caso de que la temperatura caiga en el producto pasteurizado debido a un eventual corte en el fluido de calentamiento, la instalación de pasteurización debe estar dotada de una válvula de desvío del flujo para retornar la leche tratada insuficientemente hacia el tanque pulmón del pasteurizador.

De acuerdo con las regulaciones establecidas por la Unión Europea, el equipo de tratamiento térmico debe ser aprobado o autorizado por la autoridad competente y al menos irá equipado de

- control automático de temperatura
- termómetro registrador
- dispositivo automático de seguridad para prevenir un calentamiento insuficiente
- sistema de seguridad adecuado para prevenir la mezcla de leche pasteurizada o esterilizada con leche calentada de forma incompleta, y
- dispositivo de registro automático del sistema de seguridad referido anteriormente.

Equipamiento requerido

Se necesitan los siguientes equipos para conseguir un proceso adecuadamente automatizado y controlado a distancia:

- Tanques silo para almacenamiento de la leche cruda.
- Intercambiador de calor de placas para calentamiento y enfriamiento, dotado de tubo de mantenimiento y de una unidad de agua caliente.
- Clarificadora centrífuga (como se va a tratar solamente leche entera, no se necesita una desnatadora centrífuga en este ejemplo).
- Tanque de almacenamiento intermedio para almacenamiento temporal de leche procesada.
- Tuberías y accesorios de conexión de los componentes principales, y válvulas accionadas neumáticamente para el control y distribución del flujo de producto y de los fluidos de limpieza.
- Bombas para el transporte de la leche a través de toda la planta de tratamiento de leche.
- Equipo para el control de capacidad, temperatura de pasteurización y posiciones de las válvulas.
- Distintos sistemas auxiliares:
  -abastecimiento de agua
  -producción de vapor
  -refrigeración para enfriamiento
  -aire comprimido para abastecer a las unidades accionadas neumáticamente
  -potencia eléctrica
  -evacuación de aguas residuales

La mayor parte de los sistemas auxiliares se describen en el capítulo 6.11. Las necesidades de fluidos caloportadores se calculan una vez que se ha establecido el diseño de la planta. Para esto es necesario conocer el programa de temperaturas de pasteurización, así como las especificaciones de todas las demás áreas donde se necesiten fluidos de calentamiento y enfriamiento (almacenamiento refrigerado, sistemas de limpieza, etc.), antes de poder determinar el número y potencia de las máquinas accionadas eléctricamente, número de unidades operadas neumáticamente, horas de trabajo de la planta, etc. Estos cálculos no se presentan en este libro.

Requerimientos legales para:

- Tratamiento térmico
- Registro
- Clarificación anterior al tratamiento térmico
- Prevención de la reinfección

Selección de equipos

Tanques silo

El número y tamaño de tanques silo se determina una vez que se conocen los ritmos de recepción y los volúmenes de cada suministro. Con el fin de operar la

planta de forma continua, sin paradas debidas a la falta de materia prima, se debe tener un abastecimiento de leche cruda desde las 7 horas de la mañana.

Es recomendable que la leche haya sido almacenada al menos 1-2 horas antes de que sea procesada, ya que durante este periodo de tiempo tiene lugar la eliminación natural de gases de la leche. Son aceptables también cortos periodos de agitación, aunque la agitación realmente no es necesaria hasta 5-10 minutos antes del comienzo del vaciado, para igualar la calidad de todo el contenido del tanque. Esto evita interferencias con la eliminación natural de los gases de la leche.

Intercambiador de calor de placas

El objetivo principal de la pasteurización de la leche es destruir los microorganismos patógenos. Para conseguir esto, la leche normalmente se calienta hasta una temperatura superior a 72°C durante más de 15 segundos y a continuación se enfría rápidamente. Estos parámetros vienen establecidos en las normas establecidas legalmente de muchos paises.

Cuando se conocen los parámetros importantes del proceso, se puede llevar a cabo el dimensionado del intercambiador de calor de placas. En este ejemplo, los parámetros son:

- Capacidad de la planta 20.000 l/h
- Programa de temperaturas 4°C - 72°C - 4°C
- Efecto regenerativo 94%
- Temperatura del medio de calentamiento 74 -75°C
- Temperatura del refrigerante +2°C

También se determina la demanda de fluidos caloportadores (vapor, agua y agua helada), ya que influye de forma sustancial en la elección de válvulas de regulación de la entrada de vapor y agua helada.

Las placas de conexión entre secciones del intercambiador de calor están provistas de entradas y salidas para el producto y los fluidos caloportadores. Las conexiones de entrada y salida se pueden orientar horizontal o verticalmente. Los extremos del intercambiador de calor de placas (bastidor y placa de presión) se pueden ajustar con las entradas y salidas.

Los datos de diseño del intercambiador de calor de placas se dan en el capítulo 6.1.

Sistemas de calentamiento con agua

El agua caliente o el vapor saturado a presión atmosférica se pueden utilizar como medio de calentamiento en los pasteurizadores. El vapor sobrecalentado, sin embargo, no se utiliza debido al excesivo diferencial de temperatura. El medio de calentamiento más utilizado es entonces el agua caliente a unos 2-3°C por encima de la temperatura deseada del producto.

El vapor se suministra desde la caldera de la industria a una presión de 600-700 kPa (6-7 bar). Este vapor se utiliza para calentar agua, que a su vez calentará el producto hasta la temperatura de pasteurización.

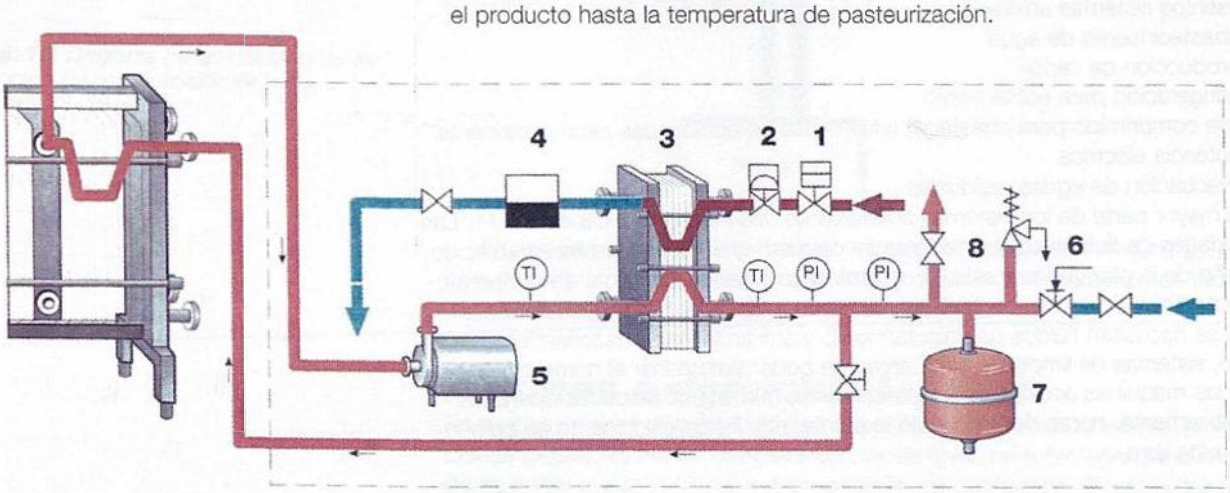


Fig. 7.2 *Principio de funcionamiento del sistema de agua caliente conectado al pasteurizador.*

1. *Válvula de cierre de vapor*
2. *Válvula de regulación de vapor*
3. *Intercambiador de calor*
4. *Purgador de vapor*
5. *Bomba centrífuga*
6. *Válvula de regulación de agua*
7. *Depósito de expansión*
8. *Válvulas de purga de aire y de seguridad*

TI Indicador de temperatura
PI Indicador de presión
Vapor
Medio de calentamiento
Agua, incluso condensada

El calentador de agua de la Figura 7.2 es un sistema cerrado que consiste en un intercambiador de calor de placas especialmente diseñado, compacto y del tipo de simple cuerpo (3) equipado con una válvula de regulación de vapor (2) y de un purgador de vapor (4). El agua caliente es impulsada por medio de una bomba centrífuga (5) pasando por el calentador (3) y la sección de calentamiento del pasteurizador.

La función del depósito de expansión (7) es compensar el incremento de volumen del agua que se produce cuando se calienta. El sistema también incluye indicadores de presión y temperatura así como válvulas de ventilación y seguridad (8).

Control de temperatura

La temperatura de pasteurización se mantiene constante por medio de un controlador de temperatura que actua sobre la válvula de regulación de vapor (ref. 2 en la Figura 7.2). Cualquier tendencia a caer la temperatura del producto se detecta inmediatamente por un sensor colocado en la línea de producto antes de entrar en el tubo de mantenimiento. El sensor entonces cambia la señal al controlador, que abre la válvula de regulación de vapor para suministrar más vapor al agua. Esto incrementa la temperatura del agua en circulación y detiene la caida de temperatura en el producto.

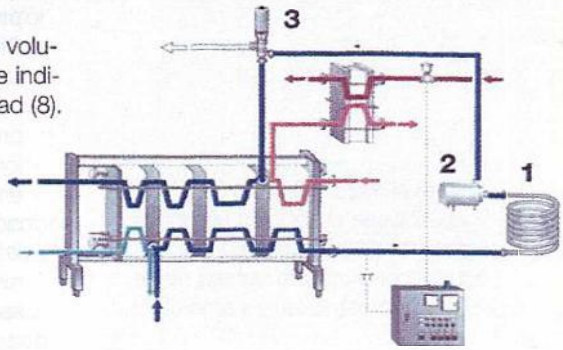


Fig. 7.3 *Lazo de control automático de temperatura.*

TT Transmisor de temperatura
1. Tubo de mantenimiento
2. Bomba de refuerzo
3. Válvula de desvío

Producto
Vapor
Medio de calentamiento
Medio de enfriamiento
Flujo desviado

Mantenimiento

La longitud y tamaño del tubo de mantenimiento situado en el exterior del intercambiador de calor de placas se calculan de acuerdo con el tiempo conocido de mantenimiento y de la capacidad horaria de la planta y las dimensiones de la tubería que normalmente son semejantes a las de la tubería de alimentación de la planta de pasteurización. Los datos de dimensionado del tubo de mantenimiento se dan en el capítulo 6.1. Normalmente, el tubo de mantenimiento se recubre con una lámina de acero inoxidable para evitar que se queme el personal por contacto directo o por radiación.

Control de la pasteurización

Es esencial tener la certeza de que la leche ha sido adecuadamente pasteurizada antes de que salga del intercambiador de calor de placas. Si la temperatura cae por debajo de los 72°C, la leche no pasteurizada debe mantenerse aparte de la leche pasterizada correctamente. Para conseguir esto, se instalan en el tramo de tubería de salida del tubo de mantenimiento un transmisor de temperatura y una válvula de desvío de flujo. La válvula retorna la leche no pasteurizada al tanque pulmón si el transmisor de temperatura detecta que la leche que ha pasado no se ha calentado suficientemente.

Sistema de enfriamiento del pasteurizador

Como ya se ha indicado anteriormente, el producto se enfría principalmente por medio de la recuperación de calor en el cuerpo correspondiente del intercanbiador. El rendimiento máximo práctico de la regeneración es del 94-95%, que significa que la temperatura más baja obtenida por enfriamiento regenerativo es de 8-9°C. El enfriamiento de la leche hasta 4°C para su almacenamiento necesitará entonces un medio de enfriamiento con una temperatura de unos 2°C. El agua helada se puede utilizar sólo si la temperatura final es superior a 3-4°C. Para temperaturas más bajas es necesario el uso de salmuera o soluciones alcohólicas para evitar el riesgo de congelación del medio de enfriamiento.

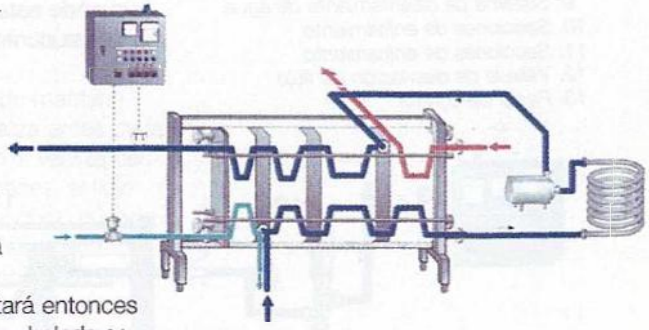


Fig. 7.4 *Sistema de enfriamiento para el pasteurizador.*

TT Transmisor de temperatura

Producto
Medio de calentamiento
Medio de enfriamiento

El refrigerante se hace circular desde la instalación frigorífica de enfriamiento de la propia industria hasta el punto de uso, tal como se muestra en la Figura 7.4. El caudal de refrigerante hacia la sección de enfriamiento del pasteurizador se controla para mantener una temperatura de salida del producto constante. Esto se hace por medio de un circuito de regulación que consiste en un transmisor de temperatura colocado en la línea de salida de producto, un controlador de temperatura situado en el panel de control y una válvula de regulación situada en la línea de abastecimiento de refrigerante. La posición de la válvula de regulación se altera por medio del controlador en respuesta a las señales procedentes del transmisor.

La señal del transmisor es directamente proporcional a la temperatura de salida del producto del pasteurizador. Esta señal se conecta normalmente al registrador de temperatura situado en el panel de control y se registra sobre una gráfica,

junto con la temperatura de pasteurización y la posición de la válvula de desvío de flujo.

Bomba de refuerzo para prevenir la reinfección

Se debe tener especial cuidado para evitar cualquier riesgo de contaminación del producto ya pasteurizado por producto no pasteurizado o medio de enfriamiento. Si ocurriese cualquier fuga en el pasteurizador, *se debe producir desde el producto pasteurizado al no pasteurizado o medio de enfriamiento*.

Esto significa que el lado de producto pasteurizado debe estar sometido a una presión más alta que el lado del medio de enfriamiento en el intercambiador de calor de placas. Por ésto se instala una bomba de refuerzo (ref. 2 de la Figura 7.3) en la línea de producto, sea tras la sección de mantenimiento o antes de la sección de calentamiento. La última posición minimiza la temperatura de operación de la bomba y prolonga su vida. La bomba incrementa la presión y mantiene un diferencial de presión positiva en el lado de producto pasteurizado, a través de las secciones de recuperación de calor y de enfriamiento del pasteurizador.

La instalación de una bomba de refuerzo viene especificada en las exigencias legales de pasteurización de muchos paises.

El pasteurizador completo

Un moderno pasteurizador de leche, completo con todo el equipo necesario para su operación, supervisión y control del proceso, se monta con esos componentes en una unidad de proceso sofisticada.

Tanque de regulación

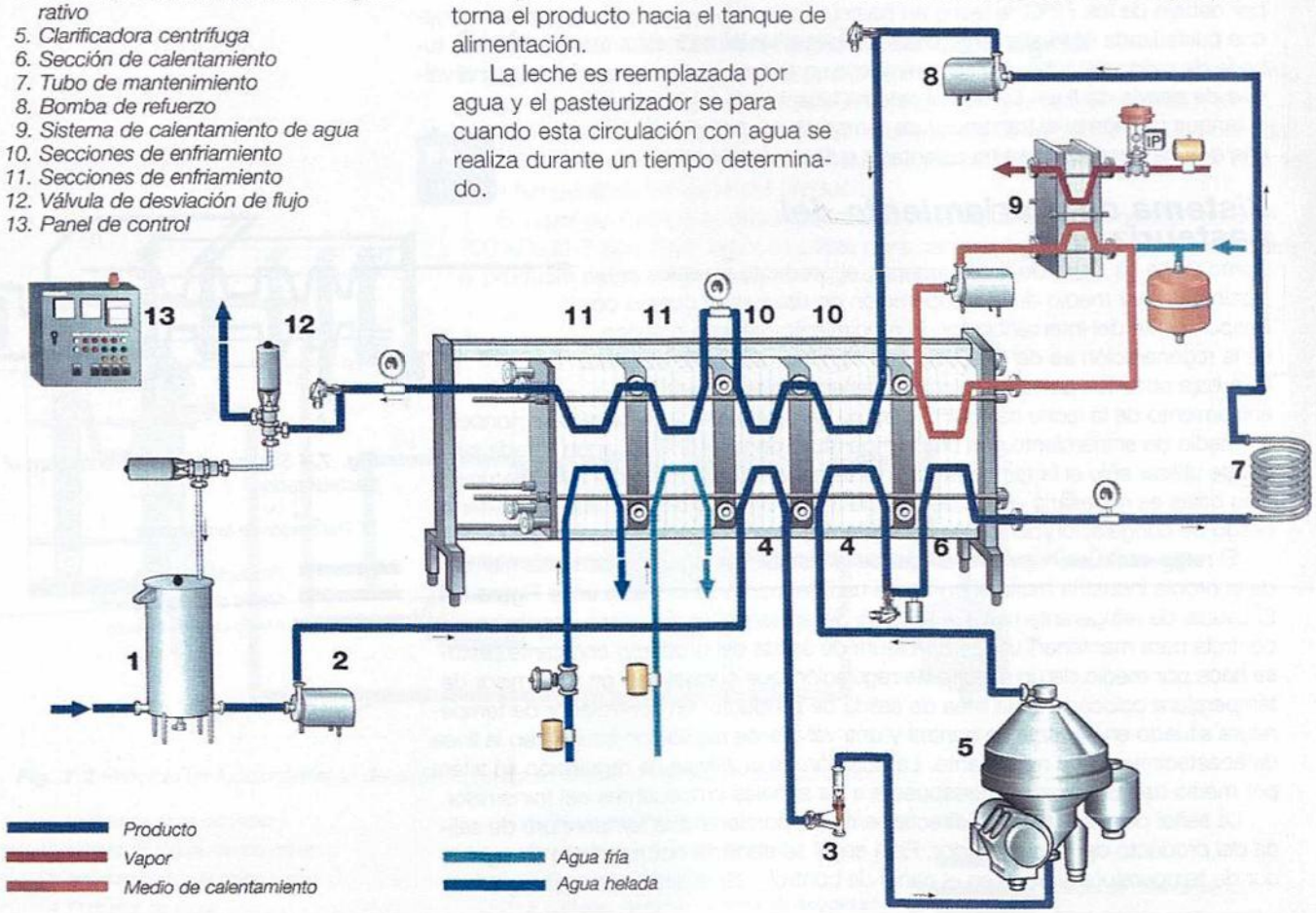
La válvula de entrada controlada por flotador regula el flujo de leche y mantiene un nivel constante en el tanque de regulación. Si se interrumpe el suministro de leche, comenzará a descender el nivel.

Como el pasteurizador, mientras funciona, debe estar siempre lleno para evitar que el producto se queme sobre las placas, el tanque de regulación se instala con un electrodo de nivel bajo que transmite una señal tan pronto como el nivel alcanza un punto mínimo. Esta señal actua sobre la válvula de desvío de flujo, que retorna el producto hacia el tanque de alimentación.

La leche es reemplazada por agua y el pasteurizador se para cuando esta circulación con agua se realiza durante un tiempo determinado.

Fig. 7.5 *Planta completa de pasteurización, con:*

1. *Tanque de regulación*
2. *Bomba de alimentación*
3. *Controlador de caudal*
4. *Secciones de precalentamiento regenerativo*
5. *Clarificadora centrífuga*
6. *Sección de calentamiento*
7. *Tubo de mantenimiento*
8. *Bomba de refuerzo*
9. *Sistema de calentamiento de agua*
10. *Secciones de enfriamiento*
11. *Secciones de enfriamiento*
12. *Válvula de desviación de flujo*
13. *Panel de control*



Bomba de alimentación

La bomba de alimentación abastece al pasteurizador con leche desde el tanque de regulación o pulmón, proporcionando un nivel de presión o carga constante.

Controlador de caudal

El controlador de caudal mantiene el caudal a través del pasteurizador en el valor correcto. Esto garantiza un control estable de la temperatura y un valor constante del tiempo de mantenimiento para conseguir un determinado efecto de pasteurización. Normalmente el controlador de caudal se coloca tras la primera sección regenerativa.

Precalentamiento regenerativo

La leche fría sin tratar se bombea a través de la primera sección del pasteurizador (sección de precalentamiento). Aquí se calienta recuperandose calor de la leche pasteurizada, que se enfría al mismo tiempo.

Si la leche va a ser tratada a una temperatura intermedia entre las temperaturas de entrada y salida de la sección de regeneración, por ejemplo la clarificación a 55°C, la sección de regeneración se divide en dos secciones. La primera sección se dimensiona de forma que la leche salga a la temperatura requerida de 55°C. Una vez que se ha clarificado la leche vuelve al pasteurizador, donde se completa el calentamiento regenerativo en la segunda sección.

El ahorro energético por la recuperación de calor en la sección de precalentamiento/preenfriamiento en un pasteurizador de leche, normalmente es del orden del 90-96%.

Pasteurización

El calentamiento final hasta la temperatura de pasteurización con agua caliente, normalmente a una temperatura 2-3°C más alta que la temperatura de pasteurización (Δt = 2-3°C), tiene lugar en la sección de calentamiento. La leche caliente continua por el tubo de mantenimiento. Transmite una señal continua al controlador de temperatura situado en el panel de control. La misma señal se transmite también hasta un instrumento de registro de la temperatura de pasteurización.

Desvío de flujo

Un sensor situado tras la célula de mantenimiento transmite una señal hasta el monitor de temperatura. Tan pronto como cae esta señal por debajo de un valor consigna, que se corresponde con una temperatura mínima especificada, el monitor acciona la válvula de desvío de flujo para retornar el producto. En muchas plantas la posición de la válvula de desvío de flujo se registra junto con la temperatura de pasteurización.

Para resolver la instalación de la válvula de desvío de flujo, se tienen varias soluciones para satisfacer las normas y recomendaciones locales. A continuación se indican tres soluciones que se utilizan normalmente:

1. La válvula de desvío de flujo se situa justo después de la célula de mantenimiento. Cuando se instala una bomba de refuerzo, la válvula se localiza antes de la bomba. Si la temperatura cae por debajo de un nivel preestablecido la válvula desvía el flujo hacia el tanque de alimentación y la bomba se para. Entonces, el flujo en las secciones regenerativa y de enfriamiento quedan en espera (incluso cuando no se tiene una bomba de refuerzo). Tras una corta espera, sin que se produzca un aumento de temperatura, el intercambiador de calor se vacía, limpia y desinfecta. Cuando es posible de nuevo un calentamiento satisfactorio la planta vuelve a funcionar.

2. La válvula de desvío de flujo se localiza tras la sección de enfriamiento de la planta. Cuando se detecta una caida de temperatura el flujo se desvía hacia el tanque pulmón de alimentación y la planta se vacía de producto, limpia y desinfecta. La planta se tiene entonces lista para volver a empezar cuando las condiciones de temperatura sean aceptables de nuevo.

3. La válvula de desvío de flujo se localiza entre la célula de mantenimiento y la bomba de refuerzo. Si la temperatura cae la válvula desvía el flujo. La bomba de refuerzo no se para, sino que determinadas válvulas del intercambiador se posicionarán automáticamente de forma que la leche en las secciones regenerativa y de enfriamiento sea circulada para mantener una presión correcta en la planta. Esto también consigue un adecuado equilibrio de temperaturas. Cuando las condiciones de calentamiento son de nuevo adecuadas el proceso se puede recomenzar sin limpieza intermedia.

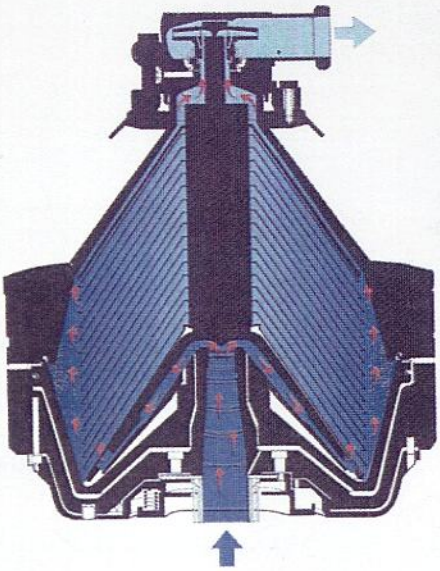


Fig. 7.6 *Cuerpo de una clarificadora centrífuga.*

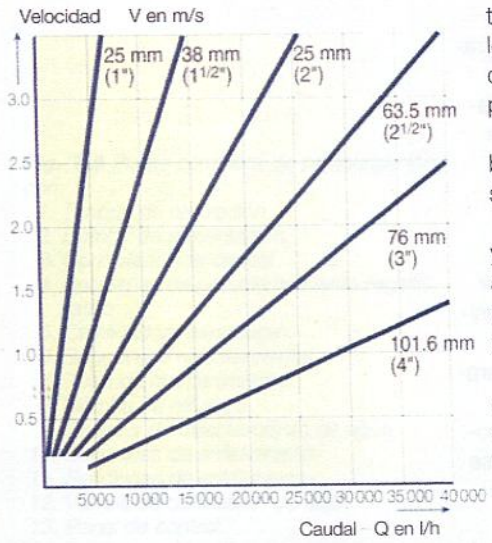


Fig. 7.7 *Gráfica donde se muestra la relación entre velocidad del producto y caudal.*

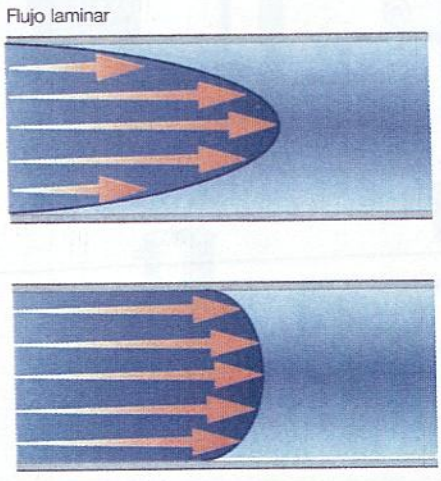


Fig. 7.8 *Diagrama de perfil de velocidades para flujos laminar y turbulento.*

Enfriamiento

Tras la sección de calentamiento la leche se retorna a las secciones de regeneración para su enfriamiento. Aquí la leche pasteurizada cede calor a la leche fría entrante. La leche pasteurizada saliente es entonces enfriada con agua fría, agua helada, una solución glicolada o algún otro refrigerante, dependiendo de la temperatura requerida. La temperatura de la leche fría se registra normalmente junto con la temperatura de pasteurización y la posición de la válvula de desvío de flujo. Por lo tanto, se muestran tres curvas en la gráfica.

Clarificadora centrífuga

Como la leche en este ejemplo no se va a separar en leche desnatada y nata, se utilizará una clarificadora como la que se muestra en la Figura 7.6.

En algunas industrias lácteas está establecido realizar la clarificación centrífuga de la leche cruda fría (<6ºC) inmediatamente después de la recepción en la industria, sobre todo cuando la leche se va a almacenar hasta el día siguiente. Sin embargo, la clarificación a 55ºC es mucho más eficiente porque la viscosidad de la leche es menor a esa temperatura.

En este caso la leche que alimenta a la clarificadora se toma a 55ºC de la primera sección de calentamiento regenerativo.

Diseño de la red de tuberías

En el ejemplo de este capítulo, tienen que pasar 20.000 litros de leche por hora a través de tuberías, accesorios y equipos de proceso durante la producción. La velocidad de paso del producto por dichas tuberías viene determinada por el tamaño de su diámetro interior. Cuanto mayor sea el diámetro, menor será la velocidad del producto.

Para un caudal de 20.000 litros por hora, la velocidad del producto en una tubería de 76 mm (3") de diámetro será de 1.25 m/s. La velocidad será de 2.75 m/s si se selecciona una tubería de 51 mm (2").

Velocidades más altas dan lugar a una mayor fricción dentro del propio líquido y entre el líquido y las paredes de la tubería. De esta manera se dará una mayor agitación mecánica al producto. Para cada líquido existe una velocidad límite superior que no debe ser sobrepasada si queremos mantener su calidad. Para la leche, esta velocidad es de alrededor de 1.8 m/s.

Entonces, puede parecer razonable elegir una tubería de diámetro superior al mínimo necesario por razones de velocidad. Pero las tuberías de mayor diámetro suponen unos costes mayores. Por lo tanto, se suele elegir el diámetro superior más cercano al límite. En nuestro caso se elegiría la tubería de 2.5" (63.5 mm), que corresponde a una velocidad de 1.75 m/s, tal como se puede ver en la Figura 7.7.

Flujos laminar y turbulento

El flujo laminar es aquel en el que las partículas se mueven según venas paralelas y uniformes durante su movimiento. Este tipo de flujo se presenta, por ejemplo, en tramos rectos de tuberías de sección circular, o entre paredes paralelas a bajas velocidades.

Por otra parte, en el flujo turbulento las partículas tienen movimientos erráticos y se entremezclan unas con otras de forma intensa.

La Figura 7.8 muestra cómo la longitud de cada cuerpo de flecha representa la velocidad media de las partículas en los diversos puntos de la sección de paso. En el flujo laminar se presenta la mayor velocidad en el centro de la sección de paso. Debido a la fricción entre las capas, la velocidad va disminuyendo progresivamente hacia las paredes de la tubería, donde se anula.

En el flujo turbulento, las capas se entremezclan y, por lo tanto, la velocidad del líquido es más o menos la misma en la parte central de la sección de paso, pero cae rápidamente en las proximidades de las paredes. En éstas, una delgada capa laminar de producto tendrá una velocidad instantánea cero.

Para conseguir un flujo laminar en tuberías de sección circular el diámetro debe ser relativamente pequeño, la velocidad baja y la viscosidad del líquido alta.

Resistencia al flujo

Cualquier componente que está insertado en la red de tuberías ofrece un resistencia al flujo cuando el líquido se fuerza a pasar a través de esa tubería. En los tramos rectos de la tubería la resistencia se debe a la fricción entre el líquido y las

paredes. En los codos tiene lugar una fricción adicional en el líquido a causa del cambio de dirección que se provoca. De manera similar a la fricción, los cambios de dirección y los cambios de sección dan lugar a una resistencia en accesorios, válvulas y equipos de proceso. La magnitud de esta resistencia está directamente relacionada con la velocidad del líquido que se transporta.

La resistencia de cada componente en la línea se puede obtener de un coeficiente de resistencia dado por el fabricante de ese componente. La resistencia total del la línea se puede calcular entonces multiplicando la suma de los coeficientes por el cuadrado de la velocidad de flujo y dividiendo el resultado por $2g$ (siendo g la aceleración debida a la gravedad = 9.81 m/s²).

Ejemplo: La velocidad del producto en el sistema de tuberías es de 1.75 m/s (diámetro de la tubería, 2.5", y caudal 20.000 litros/ hora). La suma de los coeficientes de resistencia es de 190. La resistencia al flujo será, por lo tanto:

$$\frac{1.75 \times 1.75 \times 190}{2 \times 9.81} = 29.7 \text{ metros de columna de líquido o carga}$$

La resistencia al flujo se expresa en términos de columna de líquido, o carga, que es la altura en metros de columna de líquido que se necesitaría para compensar las pérdidas de presión producidas por la resistencia. Esto está relacionado con la aplicación original del bombeo, como operación consistente en elevar agua desde un nivel inferior hasta otro superior, por ejemplo desde una mina hasta la superficie de la tierra. El funcionamiento de la bomba se juzgaba entonces por la altura a la que podía elevar el agua. En nuestro caso, la resistencia total en el sistema de tuberías es equivalente al trabajo que realizaría la bomba elevando verticalmente 30 metros un líquido.

Esto indica también que una columna de agua de 30 metros de altura proporcionaría la suficiente presión como para superar esa resistencia al flujo, tal como se indica en la Figura 7.9.

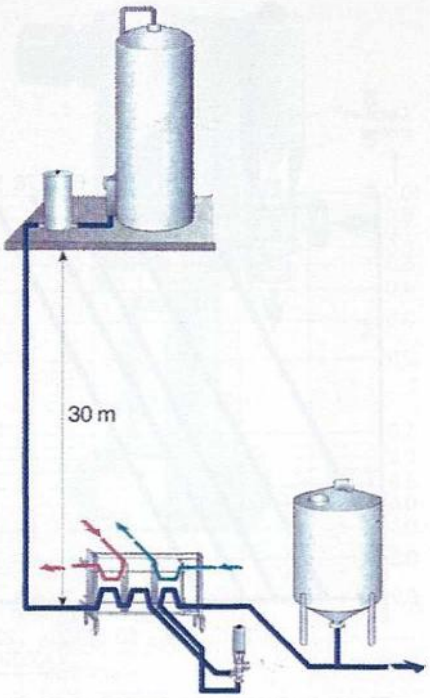


Fig. 7.9 *Línea de proceso ilustrando el ejemplo con una carga de 30 metros entre el tanque y la línea de proceso.*

Caida de presión

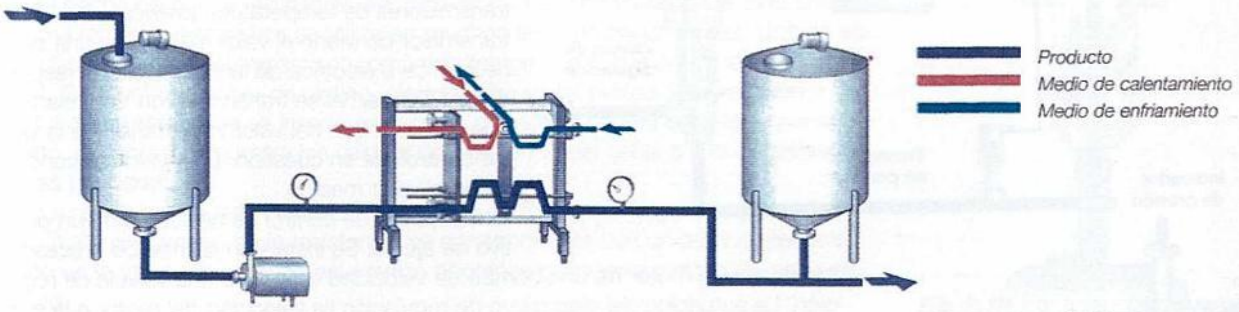


Fig. 7.10 *La pérdida de carga se puede ver instalando indicadores de presión en la línea de proceso.*

La resistencia al flujo de un líquido en un componente origina una caida de presión. Si se mide la presión con un manómetro (Figura 7.10) antes y después de dicho componente, la presión será inferior a la salida. El componente, por ejemplo una válvula de corte, provoca una caida de presión en la línea. Esta caida de presión, medida en términos de carga, es equivalente a la resistencia opuesta por el componente y su magnitud depende de la velocidad, es decir, del caudal y del tamaño de las tuberías.

La caida de presión provocada por un componente se expresa a veces como la pérdida de carga en metros para los diferentes caudales, en vez de por coeficientes de resistencia. La gráfica de la Figura 7.11, para una válvula de cierre, cubre los caudales desde 5.000 litros/hora para la tubería de diámetro más pequeño, de 1.5" (38 mm), hasta 200.000 litros/hora para la de mayor diámetro, 4" (101.6 mm).

Para un caudal de 20.000 litros/hora, que para una tubería de 2.5" (63.5 mm) significa una velocidad de 1.75 m/s, el gráfico indica una pérdida de presión, o pérdida de carga de 0.4 metros cuando la válvula está totalmente abierta.

Las pérdidas de carga en cada uno de los componentes de la línea para un determinado caudal pueden determinarse de la misma forma. Estos valores, una vez sumados, dan la caída de presión total en el sistema.

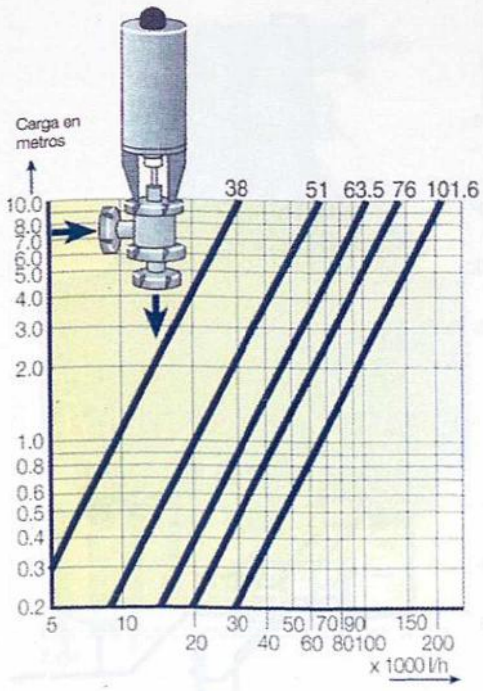


Fig. 7.11 *Gráfica de pérdidas de carga para una válvula de cierre.*

Cada componente de la línea debe dimensionarse para provocar la menor pérdida de carga posible. Una caída de presión lleva consigo un incremento en la velocidad de circulación, bien en forma de turbulencias o por aceleración local en determinadas zonas de paso. Velocidades más altas dan como resultado un aumento de la fricción en las superficies de las tuberías y otros equipos y mayores fuerzas en los codos, etc. Esto aumenta la agitación mecánica del producto.

En el caso de la leche todo ello puede conducir a la rotura de los glóbulos de grasa, exponiendo la grasa liberada al ataque de enzimas lipásicas. Finalmente, el aumento en ácidos grasos libres que se produce afecta al sabor de la leche de forma adversa. Este problema se ve agravado si hay aire presente durante la agitación mecánica del producto. Esto puede suceder cuando se absorbe aire a través de uniones defectuosas. En el caso de otros productos, como el yogur, el tratamiento debe ser particularmente suave. Se debe de tener gran cuidado en la selección de los componentes así como en el dimensionado y diseño de la linea de proceso.

El tamaño de las tuberías debe ser tal que la velocidad del liquido no sobrepase el valor crítico para el producto en cuestión (en el caso de la leche 1.8 m/s, o menos para otros derivados lácteos). Se debe mantener en el mínimo posible el número de válvulas a instalar, y las pérdidas de carga a través de las mismas deben ser tan bajas como sea posible. Se deben colocar de forma que se eviten cambios innecesarios de dirección.

Equipamiento de control de proceso

Con objeto de asegurar un funcionamiento sin problemas y que la calidad del producto sea la requerida, es necesario mantener dentro de magnitudes previamente determinadas los niveles de líquidos en depósitos, los caudales, temperaturas, presiones, concentraciones y valores de pH. El equipo necesario para monitorización y control de estos parámetros incluye distintos tipos de transmisores, controladores, y otros componentes de control. En la Figura 7.12 se muestra un lazo de control.

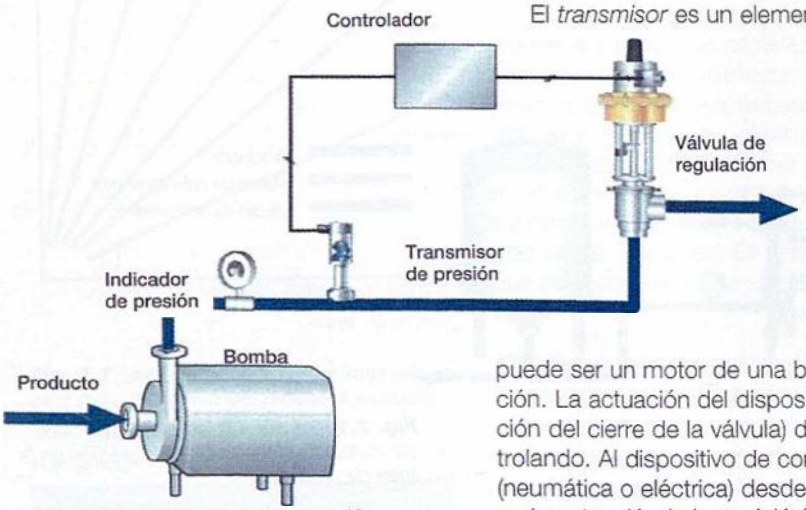


Fig. 7.12 *Lazo de control de presión, consistente en un transmisor, un controlador y una válvula de regulación controlada neumáticamente.*

El *transmisor* es un elemento sensible que mide el valor de la variable controlada en cada momento. Su diseño y función varía según las necesidades. Algunos ejemplos son los transmisores de temperatura, presión y pH. El transmisor convierte el valor medido en una señal neumática o eléctrica de la intensidad correspondiente. Esta señal se transmite a un controlador, que es informado del valor instantáneo de la variable controlada en cuestión. Este valor se conoce como el valor medido.

El *dispositivo de control* es básicamente un dispositivo de ajuste. Se instala en la línea de proceso y puede ser un motor de una bomba de velocidad variable o una válvula de regulación. La actuación del dispositivo de regulación (la velocidad del motor o la posición del cierre de la válvula) determina la magnitud de la variable que se está controlando. Al dispositivo de control se le suministra de forma continua una señal (neumática o eléctrica) desde un controlador y la intensidad de esta señal determina la actuación (o la posición) del dispositivo de regulación.

El *controlador* es el "cerebro" del sistema. Recibe la señal del transmisor, permaneciendo continuamente informado acerca del valor medido de la variable en cuestión. El controlador compara entonces este valor con uno de referencia (o consigna) previamente fijado. La actuación del dispositivo de regulación es correcta si ambos valores coinciden.

Si el valor medido cambia, la señal procedente del transmisor cambia también. El valor medido ya no es igual al valor fijado y el controlador altera su señal que envía al dispositivo de control de acuerdo con el cambio producido. Como resultado de esta información la posición del dispositivo de control se ajusta para anular el cambio detectado (se ajusta la posición de la válvula o la velocidad del motor). El transmisor detecta inmediatamente el cambio en cantidad y transmite esta información al controlador. Este ciclo de comparaciones y correcciones -el lazo de control- se repite hasta que la cantidad medida sea otra vez igual al valor fijado.

Transmisores

Los transmisores de los sistemas de control pueden variar considerablemente en diseño y funciones. Algunos transmisores reaccionan directamente a cambios en

el valor medido. Esto es aplicable al transmisor de presión que parece en la Figura 7.13. En este instrumento, la presión del producto que actúa sobre un diafragma se transfiere, a través de un tubo capilar, hasta un sensor. El sensor transmite una señal eléctrica que es directamente proporcional a la presión del producto. El controlador de nivel tipo flotador, utilizado con frecuencia en depósitos, es otro ejemplo de un dispositivo de control directo.

Tabla 7.1
Variaciones de resistencia con la temperatura de acuerdo con una característica dada.

Temperatura °C	Resistencia Ω
0	100.00
10	103.90
20	107.79
30	111.67
40	115.54
50	119.40
60	123.24
80	130.89
100	138.50

Sin embargo, la mayor parte de los transmisores actúan de forma indirecta. Miden los cambios en otro parámetro físico que tiene una relación constante con el parámetro o magnitud que queremos controlar. Este tipo de transmisor ha sido mostrado anteriormente en el estudio del transporte de líquidos a través de una línea. El caudal necesario se mantiene midiendo la presión del producto a la salida de la bomba y manteniéndola constante.

El transmisor de presión citado anteriormente puede ser también utilizado para medir el nivel en un depósito. Instalado en el fondo del tanque, registra la presión estática de la columna de líquido sobre el diafragma. Esta presión es proporcional al nivel de líquido. Una señal eléctrica se transmite entonces a un instrumento, que nos indica el nivel.

El hecho de que la resistencia eléctrica de los metales varíe con la temperatura de una forma característica se utiliza en muchos tipos de transmisores. Uno de estos transmisores es el transmisor común de temperatura, que aparece en la Figura 7.14. Se monta un cable de platino, níquel u otro metal protegido en el interior de un tubo protector, que se inserta en la línea, de modo que sea calentado por el líquido. La tabla 7.1 muestra los valores de resistencia del cable o hilo de platino a varias temperaturas

La resistencia puede medirse conectando el hilo de metal a un circuito eléctrico. Cualquier cambio en la resistencia se corresponderá con un cambio determinado en la temperatura, y de esta forma podemos conocer la temperatura del producto.

Los transmisores que hemos descrito son los más utilizados en las industrias lácteas. Pero, sin embargo, hay muchos tipos más.

Controladores

El controlador que aparece en la Figura 7.15 que es el cerebro del sistema de control de temperatura, puede presentarse también en muchas y distintas formas. De acuerdo con la definición dada anteriormente, es un dispositivo que compara continuamente el valor medido con un valor de referencia prefijado (o consigna). Cualquier diferencia percibida hace que el controlador transmita una señal de corrección a la unidad de regulación, que cambia su posición de acuerdo con dicha señal. El proceso de corrección continúa hasta que el valor medido y el prefijado sean iguales otra vez.

El controlador puede ser de tipo eléctrico o neumático. Si el transmisor es neumático y el controlador eléctrico o viceversa, las señales tienen que ir a través de un convertidor neumático/eléctrico.

En los controladores comunes se tiene un tornillo o un botón para el ajuste de la consigna, que se indica en una escala con una aguja o puntero. El valor medido, es decir, la salida del transmisor puede leerse en la escala en cualquier momento. Existe también una escala que muestra la señal de salida hacia el dispositivo de regulación.

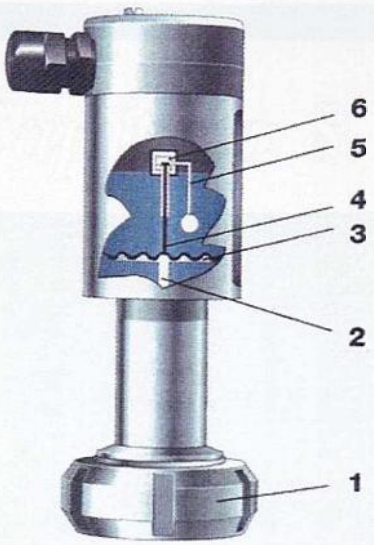


Fig. 7.13 *Transmisor de presión.*
1. Tuerca
2. Presión de proceso
3. Membrana
4. Tubo capitular
5. Presión de referencia
6. Sensor

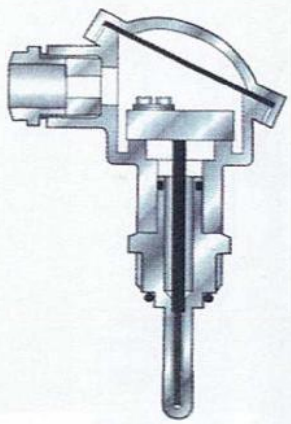


Fig. 7.14 *Transmisor de temperatura tipo resistencia.*

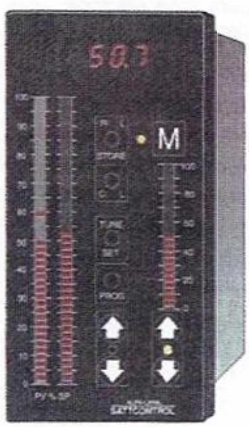


Fig. 7.15 *Controlador.*

Cuando está preparado para funcionar automáticamente, el instrumento ya no necesita ajuste manual. Pero puede cambiarse a control manual y, entonces, opera mediante un botón. La posición del controlador se indica en la escala de la señal de salida.

Algunos controladores pueden actuar como conmutadores. Esto quiere decir que pueden prepararse para emitir una señal especial al llegar a un valor máximo o mínimo. Esta señal puede ser amplificada y utilizada para llevar a cabo cambios en el proceso.

En el proceso que hemos puesto ya varias veces como ejemplo queremos que la válvula de desvío de flujo actúe recirculando el flujo si la temperatura de salida de la sección de mantenimiento del intercambiador de calor cae por debajo de 72ºC. Normalmente, se utiliza un interruptor separado de temperatura prefijada, en la monitorización de la temperatura de pasteurización.

Este interruptor se conecta al controlador de temperatura y transmite una señal a través de un relé incorporado si la temperatura cae por debajo del valor fijado. Si el interruptor se prepara para actuar a 71.9ºC, dará una señal tan pronto como la temperatura del producto baje hasta dicho valor. La señal pasa del controlador a la válvula solenoide que regula el suministro de aire a la válvula de desviación del flujo. La válvula solenoide corta entonces dicho surninistro de aire y la válvula pasa de la posición "flujo adelante" a la de "desviación de flujo".

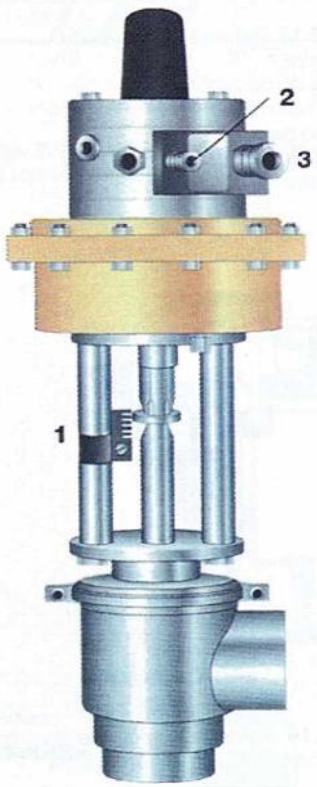


Fig. 7.16 *Válvula neumática de regulación.*
1. Indicador visual de posición
2. Conexión para señal eléctrica
3. Conexión para aire comprimido

El dispositivo de regulación

La posición del dispositivo de regulación (que se denomina también actuador final), que es accionado por el controlador, determina la magnitud de la variable controlada. El dispositivo de regulación puede ser una bomba de velocidad variable. En ese caso la señal de salida del controlador ajusta la velocidad de la bomba de tal manera que se obtenga el caudal deseado de producto. Sin embargo, los dispositivos de regulación más comunes en las industrias lácteas son las válvulas de regulación.

La Figura 7.16 muestra una válvula neumática de regulación. Consta principalmente de un cuerpo con un asiento para el obturador que está sujeto en el extremo de un vástago. La válvula opera entre las posiciones de apertura y cierre ajustando la diferencia de presión existente entre las caras superior e inferior del pistón. El actuador tiene un pistón de doble efecto. Cuando la presión es más alta en la cara inferior, el pistón se mueve hacia arriba, levantando el obturador de su asiento. Si la presión es más alta en la parte superior del pistón se cierra la válvula.

La forma de actuar es esencialmente la siguiente: las señales neumáticas del controlador pasan a un dispositivo proporcional, un posicionador, colocado en la parte superior de la válvula. Este posicionador asegura que la posición del obturador, con relación al asiento, sea siempre proporcional a la intensidad de la señal del controlador. Cuando la señal se corresponde con el valor prefijado, el posicionador equilibra la presión a cada lado del pistón, de forma que la posición del obturador permanece constante. En esta condición de equilibrio, la caída de presión en la válvula es exactamente la requerida, y el valor medido, registrado por el transmisor, coincide con el valor prefijado (consigna).

Si cae la pérdida de carga del producto, el transmisor reduce su señal al controlador. Como el valor medido ahora no coincide con el valor prefijado, el controlador reacciona aumentando su señal al actuador de la válvula. El posicionador aumenta entonces la presión en el lado superior del pistón, moviéndose el obturador o cierre hacia el asiento. El aumento resultante en la resistencia al flujo de provocado por la válvula aumenta la presión del producto e inicia el ciclo contrario de operaciones, retardandose el movimiento hacia abajo del pistón. Cuando la presión en la línea ha vuelto a ganar el valor prefijado, el posicionador mantiene de nuevo el pistón de la válvula en una posición de equilibrio.

Control automático de la temperatura

En un sistema de control automático de la temperatura, el termómetro es un transmisor de temperatura tipo resistencia colocado en la línea de producto. El dispositivo de control es una válvula de regulación operada neumáticamente, colocada en la línea de vapor. Esta válvula es mandada por un controlador neumático localizado en el panel de control del proceso. El valor requerido se fija en el controlador que entonces, por medio de la válvula, ajusta el suministro de vapor al intercambiador de calor de forma que el valor medido sea siempre igual al valor fijado en 72ºC.

Capítulo 8

Productos lácteos pasteurizados

Los productos lácteos pasteurizados son productos líquidos que están hechos a partir de leche y nata, y son fabricados para ser consumidos directamente por el público. Este grupo de productos incluye la leche entera, leche desnatada, leche normalizada y distintos tipos de nata.

Los productos acidificados también se incluyen en este grupo, pero como están hechos con cultivos bacterianos especiales serán estudiados más adelante en el capítulo 11, "Productos lácteos acidificados".

Todos los bloques integrantes de los sistemas de procesado de la leche descritos en el capítulo 6 son, en principio, utilizados en la fabricación de los productos lácteos pasteurizados.

En la mayoría de los países, la refrigeración, clarificación y pasteurización son etapas obligatorias en el tratamiento de los productos lácteos líquidos de consumo directo. La grasa se homogeneiza de forma rutinaria en muchos paises, mientras que en otros se omite la homogeneización porque la presencia de una buena "linea de nata" se considera como una prueba evidente de la calidad de la leche. La desaireación se utiliza en ciertos casos, cuando la leche tiene un alto contenido en aire y también cuando se encuentran presentes en el producto sustancias muy volátiles de sabores anormales. Esto puede ocurrir por ejemplo si el pienso utilizado en la granja contiene plantas de la familia de la cebolla.

El tratamiento de los productos lácteos líquidos requiere partir de una materia prima de alta calidad y utilizar líneas de proceso correctamente diseñadas si queremos obtener productos finales que tengan una elevada calidad. Es necesario tambien garantizar un tratamiento suave para evitar una influencia negativa sobre los constituyentes más valiosos del producto.

Con referencia a la calidad de la leche, en la Tabla 8.1 siguiente se muestran las normas microbiológicas para el comercio intra-Comunitario de la leche, establecidas por la Comisión de la Unión Europea (UE) para salvaguardar la salud humana y animal.

Tabla 8.1
Normas de la Unión Europea sobre recuento de bacterias en leche, en vigor a partir del 1 de enero de 1993.

Producto	**Recuento en placa (UFC/ml)**
Leche cruda	< 100 000
Leche cruda almacenada en silo en la industria durante más de 36 horas	< 200 000
Leche pasteurizada	< 30 000
Leche pasteurizada tras incubación durante 5 días a 8°C	< 100 000
Leche UHT y esterilizada tras incubación durante 15 días a 30°C	<10

UFC= Unidades Formadoras de Colonias

Otra medida de la calidad de la leche cruda es la cantidad máxima tolerable de células somáticas presentes en la leche cruda. El recuento de células somáticas se utiliza como criterio de rechazo de una leche anormal. Generalmente, la directiva de la UE establece que la leche se considera anormal cuando se tiene un recuento de 250.000 a 500.000 células somáticas por ml. Esta norma ha sido ajustada en enero de 1994. La leche cruda destinada al mercado intra-comunitario no debe contener más de 400.000 células somáticas por ml.

Procesado de la leche pasteurizada para consumo

Dependiendo de las distintas normas y legislaciones, el diseño de la línea de proceso para la leche pasteurizada de consumo directo varía mucho de un país a otro e incluso de una industria a otra. Por ejemplo, la normalización de la grasa (si es aplicada) puede ser mediante prenormalización, postnormalización o normalización directa. La homogeneización puede ser total o parcial, etc.

El proceso "más simple" consiste únicamente en la pasteurización de la leche entera. Dicho proceso incluirá un pasteurizador, un depósito de regulación y una máquina llenadora. El proceso se hace más complicado si se pretende producir diversos tipos de productos lácteos para consumo, como leche entera, leche desnatada, leches normalizadas y natas con distintos contenidos grasos, etc.

Se asume lo siguiente en la solución de la planta de proceso que se describe en la Figura 8.1:

- Leche cruda
  -contenido de grasa de 3.8%
  -temperatura de +4°C

- Leche normalizada
  -contenido de grasa de 3.0%
  -temperatura de +4°C
- Nata normalizada
  -contenido de grasa de 40%
  -temperatura de +5°C
- Capacidad de la planta
  -20.000 litros por hora
  -7 horas por día

La Figura 8.1 muestra un diagrama de flujo esquemático típico de una línea de tratamiento de leche para consumo. La leche entra en la planta a través del tanque de regulación (1) y se bombea hacia el intercambiador de calor de placas (4), donde se precalienta antes de que continue hacia la desnatadora (5), que produce leche desnatada y nata.

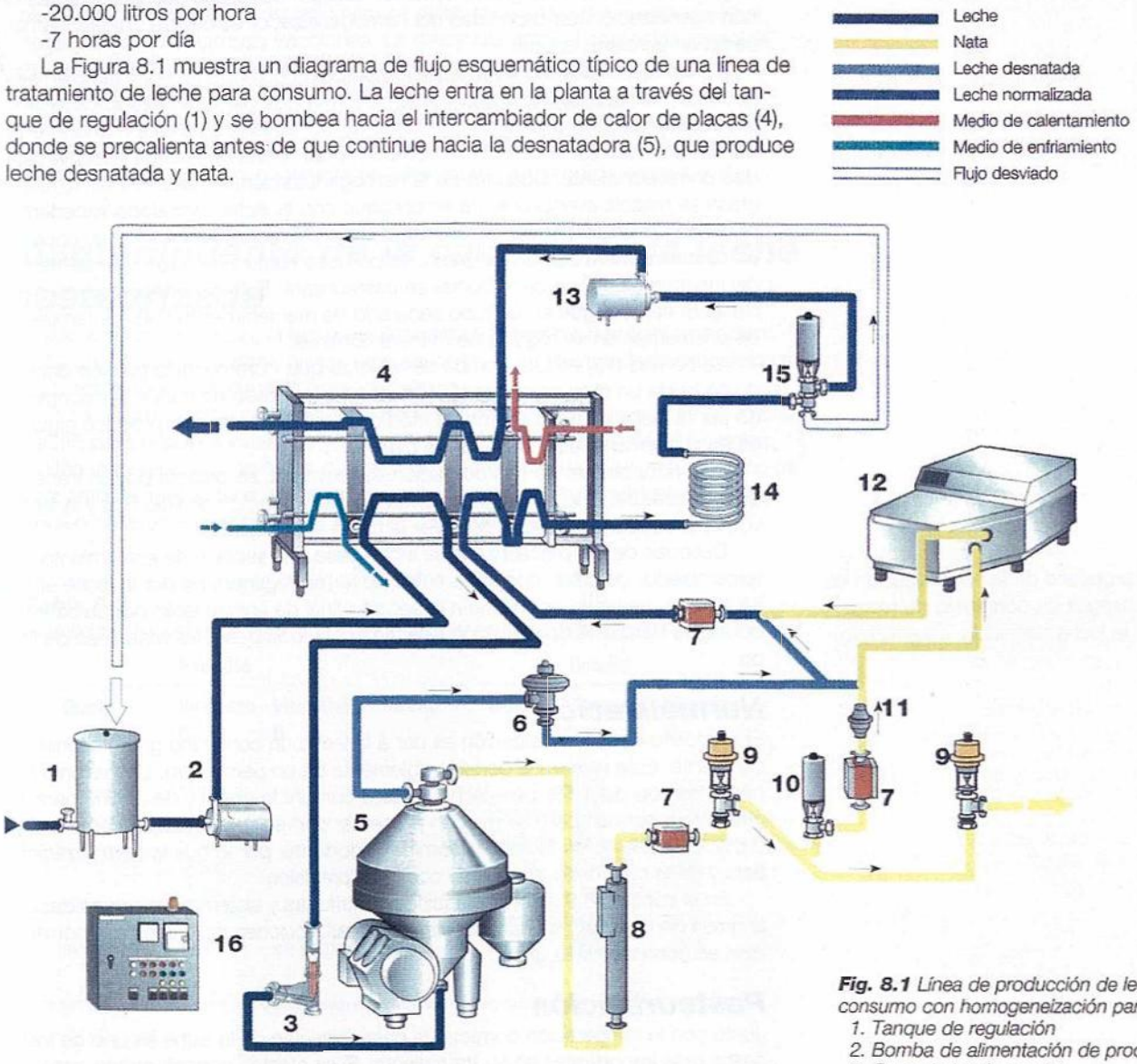


Fig. 8.1 *Línea de producción de leche de consumo con homogeneización parcial.*
1. Tanque de regulación
2. Bomba de alimentación de producto
3. Controlador de caudal
4. Intercambiador de calor de placas
5. Desnatadora
6. Válvula de presión constante
7. Transmisor de caudal
8. Transmisor de densidad
9. Válvula de regualción
10. Válvula de cierre
11. Válvula antirretorno
12. Homogeneizador
13. Bomba de refuerzo
14. Tubo de mantenimiento
15. Válvula de desvío de flujo
16. Control de proceso

La normalización de la leche para consumo se realiza en un sistema continuo del tipo que ya se ha descrito en el capítulo 6.2. El contenido en grasa de la nata procedente de la centrífuga desnatadora se fija al nivel requerido y se mantiene a ese nivel, independientemente de las moderadas variaciones en el porcentaje graso y en el caudal de la leche entrante. El contenido en grasa de la nata es normalmente de un 35-40% cuando se pretende elaborar nata montada, pero se pueden fijar otros porcentajes, como cuando se pretende elaborar mantequilla u otros tipos de nata. Una vez fijado, el contenido en grasa de la nata se mantendrá constante mediante un sistema de control que consta de un transmisor de caudal (7), de un transmisor de densidad (8), de una válvula de regulación (9) y del control del sistema de normalización.

En la línea que se muestra en la figura anterior se utiliza la homogeneización parcial, es decir, sólo se trata la nata. La razón de la elección de este sistema es que se puede manejar con un homogeneizador más pequeño (12) y de esta manera se consume menos potencia al mismo tiempo que se consigue un buen efecto de homogeneización.

El principio de trabajo del sistema, también descrito en el capítulo 6.3, será: tras el paso por el dispositivo de normalización el flujo de nata se divide en dos corrientes. Una, con un adecuado caudal volumétrico para dar a la leche de consumo su contenido final de grasa, se envía al homogeneizador. La otra, el excedente de nata, se pasa a la planta de tratamiento de nata. Como el contenido de grasa de la nata a ser homogeneizada debe ser como máximo del 10%, la nata original, con un 40% de grasa, debe ser "diluida" con leche desnatada antes de la homogeneización. La capacidad del homogeneizador se calcula cuidadosamente y se fija en un cierto caudal.

En un diseño con homogeneización parcial el homogeneizador también se conecta con la línea de leche desnatada de forma que siempre se tenga suficiente cantidad de producto para un adecuado funcionamiento. De esta manera, el caudal de nata relativamente bajo se compensa con leche desnatada hasta la capacidad correspondiente. Después de la homogeneización, la nata con un 10% de grasa se mezcla eventualmente en continuo con la leche desnatada excedente para conseguir un contenido del 3% antes de la pasteurización. La leche, ahora con un contenido normalizado de grasa, se bombea hasta la sección de calentamiento del intercambiador de calor donde se pasteurizará. El tiempo necesario de mantenimiento se consigue en un tubo separado de mantenimiento (14). La temperatura de pasteurización se registra de manera continua.

La bomba (13) es una bomba de refuerzo que incrementa la presión del producto hasta un nivel en el que el producto pasteurizado no puede ser contaminado por la leche no tratada o por el medio de enfriamiento si se produce alguna fuga en el intercambiador de calor de placas.

Si la temperatura de pasteurización es muy baja, se detecta por un transmisor de temperatura. Una señal activa la válvula de desviación de flujo (15) y la leche vuelve al depósito de regulación. Ver también el capítulo 7.

Después de ser pasteurizada, la leche pasa a la sección de enfriamiento del intercambiador de calor, donde se enfria de forma regenerativa por la leche entrante no tratada, pasando por último a la sección final de enfriamiento donde se enfría con agua helada. A continuación la leche fría se bombea a las máquinas de llenado.

El propósito de la normalización es conseguir un contenido de grasa en la leche definido y garantizado.

Normalización

El propósito de la normalización es dar a la leche un contenido graso definido y constante. Este nivel varía considerablemente de un pais a otro. Los valores más comunes son del 1.5% para leche de bajo contenido graso y de un 3% para la leche entera normal, pero se pueden presentar contenidos tan bajos como 0.1 y 0.5%. La leche es un factor económico importante, por lo que la normalizacion de ésta y de la nata debe efectuarse con gran precisión.

En el capítulo 6.2 (sobre "Máquinas centrífugas y sistemas de normalización de la grasa de la leche") se han discutido algunas opciones aplicables a la normalización en continuo de la grasa.

Pasteurización

Junto con la refrigeración correcta, la pasteurizacion de la leche es uno de los procesos más importantes en su tratamiento. Si se efectúa correctamente, este proceso consigue que la leche tenga una vida útil mayor.

El tiempo y la temperatura de pasteurización son factores muy importantes que deben ser especificados de forma precisa en relación a la calidad de la leche, a sus necesidades de vida útil, etc. La temperatura escogida para leche normal, pasteurizada con el sistema HTST y homogeneizada, es de 72-75ºC durante 15-20 segundos.

El proceso de pasteurización puede ser diferente de unos países a otros, de acuerdo con la correspondiente legislación nacional. Pero algo común a todos ellos es que el tratamiento térmico debe garantizar la destrucción de los microorganismos indeseables, y de las bacterias patógenas, sin perjudicar la calidad del producto.

Homogeneización

La homogeneización ya se ha analizado en el capítulo 6.3. El objetivo de la homogeneización es desintegrar o distribuir finamente los glóbulos de grasa en la leche con el fin de redicir la formación de la capa de nata. La homogeneización puede ser total o parcial. La homogeneización parcial es la solución más económica, debido a que se utiliza un homogeneizador más pequeño.

Determinación de la eficacia de la homogeneización

La homogeneización debe ser siempre lo suficientemente eficaz como para evitar la formación de nata en la superficie de la leche.

La eficacia del proceso se puede determinar mediante el llamado índice de homogeneización, que se expone a continuación utilizando un ejemplo.

Una muestra de leche se almacena en una probeta graduada durante 48 horas a una temperatura de 4-6°C. La capa superior (1/10 del volumen) se separa y el volumen remanente (9/10 del volumen) se agita, para analizar a continuación el contenido graso de ambas fracciones. La diferencia entre el contenido graso de ambas capas superior e inferior, expresado en porcentaje sobre la superior, es conocido como el indice de homogeneización.

Por ejemplo: si el contenido de grasa en la capa superior es del 3.15% y del 2.9% en la inferior, el índice de homogeneización será (3.15-2.9) x 100:3.15 = 7.9. El índice para la leche homogeneizada debe estar comprendido entre 1 y 10.

Mantenimiento de la calidad de la leche pasteurizada

Debido a su composición, la leche es altamente susceptible a la contaminación bacteriana y química (cobre, hierro, etc.) así como a los efectos de la exposición a la luz, sobre todo cuando está homogeneizada.

Por lo tanto es muy importante conseguir unas buenas instalaciones de limpieza (CIP) para la planta y usar detergentes, desinfectantes y agua de alta calidad.

Una vez envasada, se ha de proteger de la luz -tanto de la luz natural como de la luz artificial. La luz tiene un efecto perjudicial sobre muchos nutrientes, aunque también tiene un efecto negativo sobre el sabor de la leche.

Tabla 8.2

Pérdidas de sabor y vitaminas de la leche en una exposición a 1.500 Lux

Paquete				Botella		
Gusto	**Vitamina C**	**Vitamina B_2**	**Horas**	**Gusto**	**Vitamina C**	**Vitamina B_2**
	-1%		**2**		-10%	-10%
	-1,5%		**3**	Pequeño	-15%	-15%
	-2%		**4**	Evidente	-20%	-18%
	-2,5%		**5**	Fuerte	-25%	-20%
	-2,8%		**6**	Fuerte	-28%	-25%
	-3		**8**	Fuerte	-30%	-30%
sin pérdidas	-3,8%	sin pérdidas	**12**	Fuerte	-38%	-35%

Datos obtenidos mediante media por el Dairy Science Instituyte en la Justus Liebig University de Giessen, Alemania, en 1988.

Los malos sabores provocados por la exposición a la luz se producen a partir de las proteinas de la leche. La exposición a la luz degrada el aminoácido metionina a metional. El ácido ascórbico (vitamina C) y la riboflavina (vitamina B_2) juegan un importante papel en el proceso, debiendo estar presente el oxígeno. El metional tiene un sabor característico, algunas personas lo encuentran semejante al cartón y otros a esmeril. Este sabor no se presenta en la leche esterilizada, que es siempre homogeneizada, probablemente debido a que la vitamina C se ha degradado por el calor y los componentes S-H de las seroproteinas sufren cambios químicos.

La tabla 8.2 muestra la influencia de la luz sobre la leche pasteurizada en una botella de vidrio y en un envase de cartón. La primera pérdida de vitaminas tiene lugar cuando la leche se expone en una botella de vidrio transparente a 1500 Lux -un nivel normal de iluminación- durante sólo dos horas. En la caja opaca se tienen menores pérdidas.

Tras 4 horas de exposición se tiene ya un evidente cambio de sabor en la leche embotellada, pero no en la leche envasada en cartón.

Vida útil de la leche pasteurizada

La vida útil de la leche pasteurizada normalmente depende de la calidad de la leche cruda. Naturalmente también serán muy importantes las condiciones de producción, que han de ser óptimas desde el punto de vista técnico e higiénico, y que la planta esté adecuadamente gestionada.

Cuando se produce a partir de leche cruda con una calidad suficientemente alta y bajo unas buenas condiciones técnicas e higiénicas, la leche pasteurizada normal debe tener una vida útil de 8-10 días a 5-7°C en un envase sin abrir.

Sin embargo, la vida útil se puede reducir drásticamente si la leche cruda está contaminada con microorganismos tales como especies de Pseudomonas que forman sistemas enzimáticos resistentes al calor (lipasas y proteasas), y/o con bacilos resistentes al calor tales como B. cereus y B. Subtilis que soportan la pasteurización en estado de espora.

Para mejorar el estado bacteriológico de la leche pasteurizada y salvaguardar o incluso prolongar su vida útil, la planta de pasteurización se puede suplementar con una bactofugadora o una planta de microfiltración.

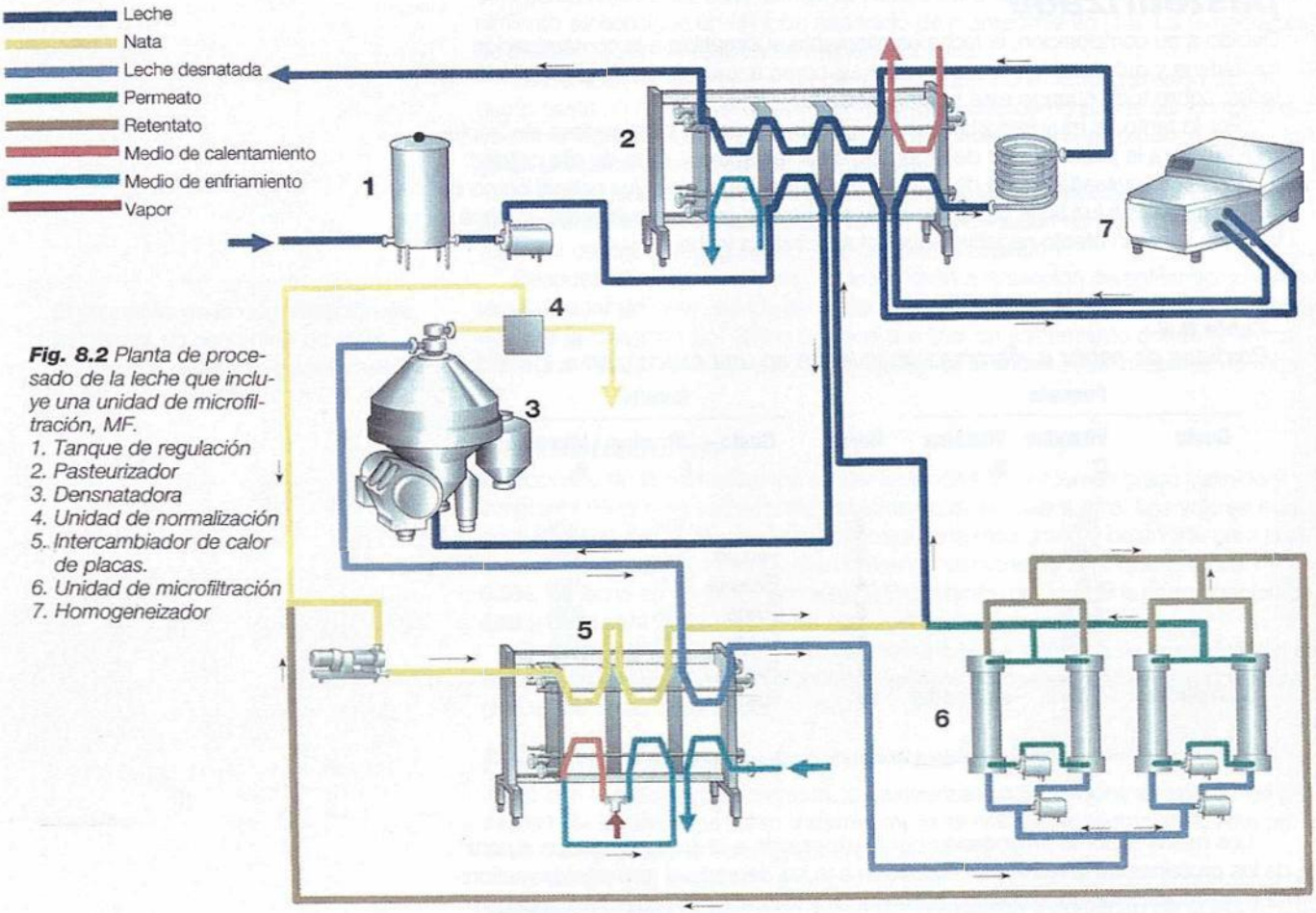


Fig. 8.2 *Planta de procesado de la leche que incluye una unidad de microfiltración, MF.*
1. Tanque de regulación
2. Pasteurizador
3. Densnatadora
4. Unidad de normalización
5. Intercambiador de calor de placas.
6. Unidad de microfiltración
7. Homogeneizador

El proceso de bactofugación se basa en la separación centrífuga de microorganismos. Aunque el efecto de reducción de la centrifugación en dos etapas sobre las esporas de bacterias es incluso superior al 99% (ver el capítulo 14, Queso), no se considera suficientemente bueno para la leche pasteurizada de consumo si se precisa aumentar la vida útil con temperaturas de almacenamiento superiores a 7°C.

Con membranas de microfiltración con tamaños de poro de 1.4 µm o menos se pueden conseguir efectos de reducción de hasta 99.5-99.99% de las bacterias y esporas. En la Figura 8.2 se ilustra un diagrama de flujo esquemático del proceso de tratamiento de leche que incluye la microfiltración.

Como los tamaños de poro que se necesitan para conseguir una retención efectiva de bacterias y esporas son tan pequeños que también retienen los glóbulos de grasa de la leche, los módulos de MF se han de alimentar con leche desna-

tada. Además de la unidad de MF la planta incluye una unidad de tratamiento a alta temperatura de la mezcla de la fase nata y el concentrado de bacterias (retentato), que tras el tratamiento térmico se vuelve a mezclar con el permeato, la fase leche desnatada procesada.

La fase nata y retentato se esterilizan a alrededor de 130ºC durante un par de segundos. Tras la remezcla con la fase leche desnatada microfiltrada, el producto se homogeneiza y finalmente se pasteuriza a 72ºC durante 15-20 segundos y se enfría hasta +4ºC.

La planta que se muestra en la Figura 8.2 puede manejar hasta 10.000 litros de leche cruda por hora. Tras la separación, la leche desnatada se envía al módulo de MF. Parte de la nata, normalmente con un 40% de contenido graso, se remezcla con la leche desnatada para producir leche de consumo pasteurizada y normalizada en contenido graso, mientras que el excedente de nata se procesa aparte. Las proporciones de nata remezclada y excedente dependen del contenido graso especificado para la leche de consumo.

La vida útil de la leche pasteurizada depende básicamente, y sobre todo, de la calidad de la leche cruda.

Alrededor del 5% del alimento deja el módulo de MF como retentato, la fase rica en bacterias. El contenido de sólidos totales oscila entre el 9 y el 10%, de los que el 3.9% es proteina (incluyendo la proteina de los microorganismos) y un 0.25% grasa.

En la planta que se está comentando todo el caudal de leche se homogeneiza, pero la homogeneización parcial también es posible.

La leche tratada de esta manera mantendrá su sabor fresco y un color blanco. Además, si se mantienen unas condiciones higiénicas estrictas en la planta, desde la recepción de la leche cruda en la planta hasta el sistema de llenado y envasado, se asegurará una larga vida útil en el producto final. Si la leche se mantiene a una temperatura inferior a 7ºC durante toda la cadena desde la industria hasta el consumidor, pasando por el vendedor al detalle, será posible esperar una vida útil de hasta 40-45 días en un envase sin abrir.

Leche "ESL"

El término inglés "Extended Shelh Life" (ESL, que en español significa "Vida Util Alargada") se aplica frecuentemente en Canadá y en USA a los productos líquidos frescos que mantienen bien su calidad a +7ºC o a temperaturas inferiores. La expresión ESL y la idea que encierra se ha extendido recientemente también a Europa y otros continentes.

No existe una definición simple de lo que significa el término ESL, ya que es un concepto que implica varios factores. Lo que significa esencialmente es la habilidad de extender la vida útil de un producto más allá de su vida útil tradicional reduciendo las fuentes más importantes de reinfección y manteniendo en cualquier caso una adecuada calidad de consumo del producto.

Un programa típico de temperatura/tiempo es 125-130ºC durante 2-4 segundos. Este tipo de tratamiento térmico se denomina también ultrapasteurización.

Producción de nata

La nata que se vende para su consumo tiene diferentes contenidos grasos. A la crema con menor contenido graso, 10-18%, se la conoce a veces como semi-nata o crema para café, y se utiliza cada vez más para la producción de postres y en la cocina doméstica. La nata con un mayor contenido en grasa, normalmente entre 35 y 40%, es mucho más espesa. Puede batirse hasta formar una espuma espesa, y por eso se la conoce como "nata montada". La nata para montar, tanto batida como sin batir, se utiliza en postres, en preparaciones culinarias, etc.

Nata para montar

Además de tener un buen sabor y conservarse bien, la nata para montar debe poseer unas buenas cualidades para su batido, es decir debe ser fácil de batir y producir una fina espuma de nata con un buen incremento en su volumen (lo que se denomina tecnicamente con el término inglés "overrrun"). La espuma debe ser firme y estable, y no ser susceptible de producir sinéresis. Una condición para su buen batido es que la nata tenga un contenido suficientemente alto de grasa. Si éste es del 40%, la nata es fácil de batir, pero es cada vez más difícil si el contenido en grasa baja del 32 %. Sin embargo, es posible batir nata con un bajo conte-

nido en grasa (aproximadamente un 25%) si se añaden sustancias que mejoran sus condiciones para el batido, por ejemplo polvo con un contenido elevado de lecitina hecho a partir de mantequilla dulce.

Se debe evitar la inclusión accidental de aire durante la fabricación de nata montada, ya que esto conduce a la formación de una espuma que es posteriormente desestabilizada. Las membranas de los glóbulos de grasa se verán dañadas si se exponen a un tratamiento mecánico excesivo, especialmente si esto se hace justo después de haber abandonado la sección de enfriamiento. Ello trae como resultado la formación de grumos de grasa. En la nata almacenada en sus envases, que ha sido tratada de forma inadecuada, se produce un ascenso hacia la superficie de parte de la grasa, formando la típica capita de nata. Esa capa superficial de nata es densa y pegajosa. Este "efecto de homogeneización" perjudica mucho las propiedades de la nata para su batido.

Durante el batido de la nata se incorpora aire a la misma de manera intencionada y controlada. Esto hace que se produzca una espuma llena de pequeñas burbujas de aire. Los glóbulos de grasa de la nata se agrupan sobre las paredes de estas burbujas. La agitación mecánica destruye la membrana de muchos glóbulos de grasa, por lo que se libera una cierta cantidad de grasa líquida. Dicha grasa hace que los glóbulos permanezcan pegados unos a otros.

Los glóbulos de grasa deben contener unas proporciones correctas de grasa cristalizada y líquida con objeto de conseguir una espuma firme. La nata caliente contiene una cantidad de grasa líquida que hace imposible su batido. Por ello, la nata que se va a batir debe ser almacenada a baja temperatura (4-6°C) durante un período relativamente largo de tiempo, con objeto de conseguir una cristalización adecuada de parte de la grasa. Este tiempo de almacenamiento se conoce como período de maduración. La nata es normalmente madurada en tanques de proceso encamisados, con agitadores rascadores. Durante el proceso de cristalización se desprende calor. Pero, el enfriamiento y la agitación no debe comenzar hasta pasadas unas dos horas después de que se haya llenado el tanque de proceso. La razón es que durante este período de cristalización los glóbulos de grasa se pueden dividir facilmente, desprendiendo grasa libre y dando lugar a un agrupamiento de glóbulos y la consiguiente formación de grumos. Durante el enfriamiento la nata debe agitarse de forma suave. En la Figura 8.4 se puede ver el progreso de la cristalización de la nata con un 40% de grasa. En la estación veraniega se pueden utilizar temperaturas finales de maduración ligeramente inferiores, ya que la grasa de la leche suele ser más blanda que durante el invierno.

El método de batido

Cuando la temperatura de la nata se mantiene por debajo de 6°C se obtiene el mejor batido. El dispositivo de batido y su depósito deben ser dimensionados correctamente de forma que el batido se complete lo más rapidamente posible. Si no es así, el aumento de temperatura puede ser considerable durante el batido, lo que da lugar a un producto de peor calidad (llegando incluso a formarse mantequilla en el peor de los casos).

Fig. 8.3 *Test de pérdida de líquido de la nata batida tras 2 horas a 18-20°C y 75% de H.R.(Humedad relativa)*

El tiempo de maduración y el incremento de volumen (overrun) son dos criterios que se deben medir para controlar las propiedades del batido. Se necesita un envase adecuado de batido (capacidad de 1 litro) y un dispositivo adecuado (preferiblemente una batidora eléctrica) para llevar a cabo esta prueba. Una cantidad adecuada de nata (unos 2 dl) se enfría hasta +6°C±1°C y a continuación se vierte en el envase de batido.

Antes de que comience el batido se mide la altura de la nata. La batidora se para cuando la espuma haya alcanzado una firmeza aceptable (lo que significa que no se caiga cuando el envase se ponga invertido).

A continuación se mide la altura de la nata batida para determinar el overrun. Si, por ejemplo, la altura era inicialmente 5 cm, y tras el batido es de 10.5 cm, el overrun será (10.5-5)x100/5 = 110%. Con un 40% de grasa el tiempo de batido debe ser unos 2 minutos y el overrun estará entre 100 y 130%.

La calidad de la espuma se mide determinando la pérdida de líquido tras 2 horas a 18-20°C y 75% de HR.

Inmediatamente después del batido y de medir el overrun, toda la nata montada se coloca en un molde metálico plano. La espuma se moldea como se muestra en la Figura 8.3 y el molde se coloca sobre un embudo de tamaño adecuado, que a su vez se coloca sobre una probeta graduada. La cantidad de líquido que se acumula en la probeta se lee tras dos horas de almacenamiento en las condiciones indicadas antes de temperatura y humedad relativa. Los criterios de evaluación son:

0-1 ml muy buena
1-4 ml buena
> 4 ml no tan buena

La línea de producción de nata montada

El método Scania

El proceso de producción de nata batida o montada incluye el calentamiento de la leche entera hasta la temperatura de desnatado de 62-64°C, desnatado y ajuste del contenido en grasa de la nata hasta el valor requerido, y pasteurización y enfriamiento de la nata en el intercambiador de calor antes de continuar hasta el tanque de maduración.

La nata con un alto contenido en grasa dará lugar a varios problemas de tratamiento que deben considerarse cuidadosamente cuando se diseña la línea de proceso. El problema más importante es cómo evitar el cizallamiento y la turbulencia durante la cristalización de la grasa. La grasa de los glóbulos se encuentra presente en forma líquida a temperaturas más altas. Dichos glóbulos parecen no afectarse con el tratamiento a temperaturas por encima de 40°C.

La grasa comienza a cristalizar tan pronto como se inicia el enfriamiento en la línea de proceso. Este es un proceso bastante lento, ya que la cristalización todavía continua después de 4 ó 5 horas. La grasa cristalizada tiene un volumen específico menor que la grasa líquida, por lo que se crean ciertas tensiones en los glóbulos de grasa durante su cristalización. Esto hace que los mismos sean muy sensibles a un tratamiento poco cuidadoso a 10-40°C.

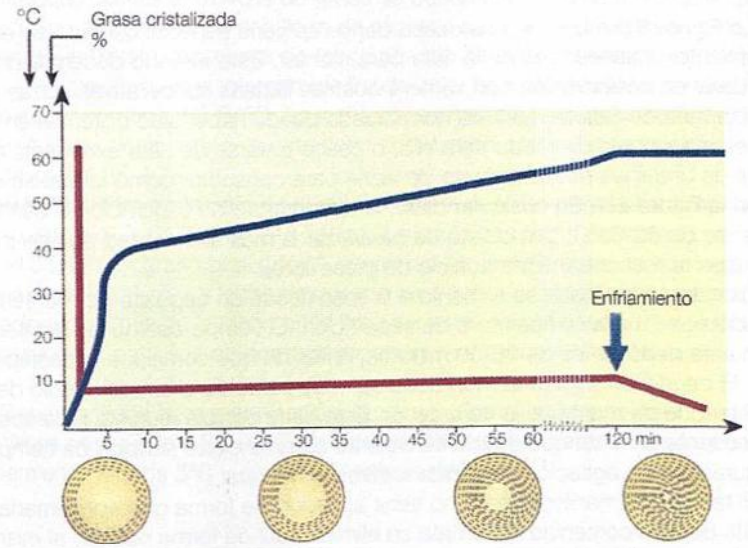


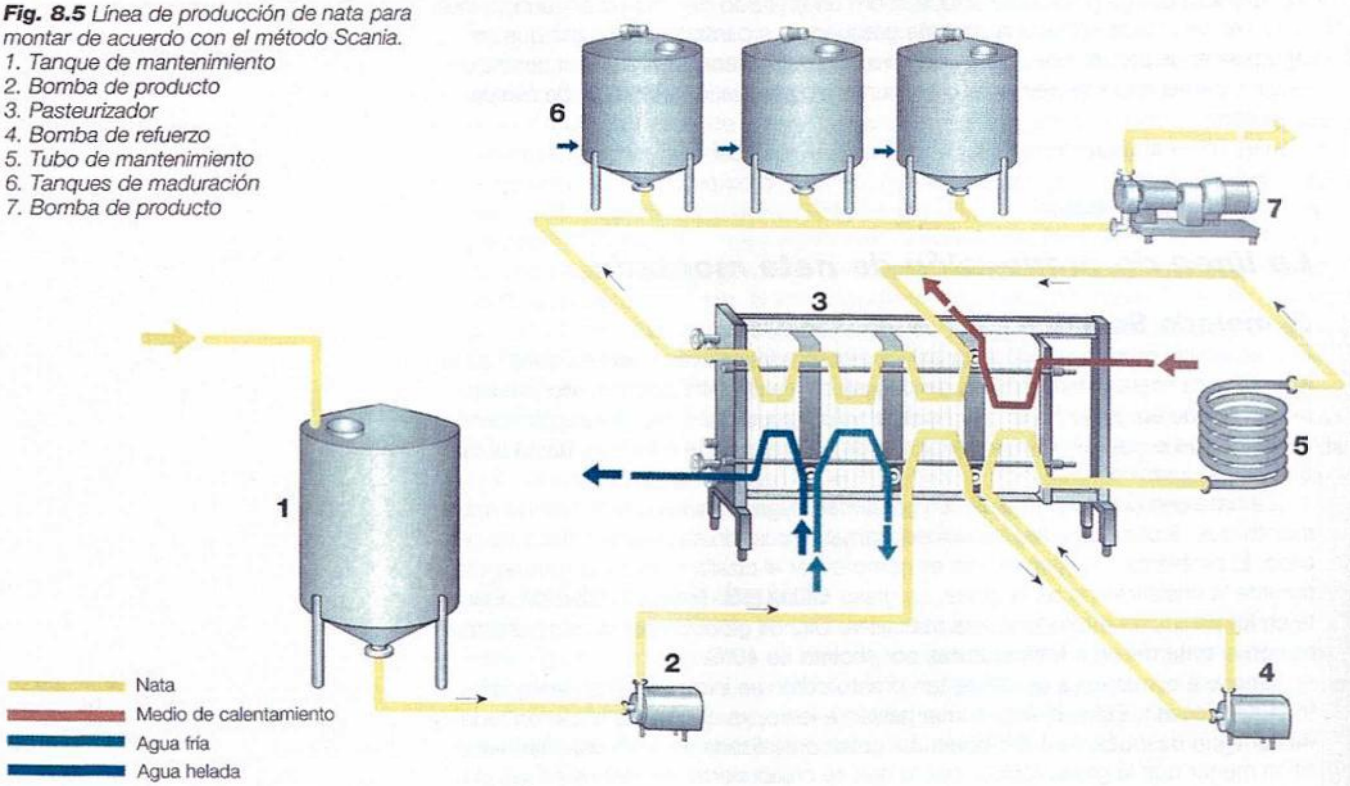
Fig. 8.4 *Proceso de cristalización para nata 40%, a 8°C.*

El progreso de la cristalización de la nata al 40% enfriada a 8ºC se ilustra en la Figura 8.5. No se debe agitar la nata mientras que se llena el tanque de maduración. La agitación y el enfriamiento comienza unas dos horas después de que el tanque se haya llenado.

La cristalización desprende calor de fusión, lo que provoca que aumente la temperatura unos 2-3ºC. El enfriamiento final en el tanque de maduración es absolutamente esencial. La nata normalmente se enfría hasta 6ºC o a una temperatura menor. Los glóbulos de grasa parecen ser menos sensibles al tratamiento de agitación a estas temperaturas, pero hay que tener en cuenta que son todavía más sensibles que a temperaturas superiores a 40ºC.

El mayor problema en la elaboración de nata batida es la formación de grumos, ya que reducen la estabilidad de la emulsión de nata. Los grumos se producen cuando los glóbulos de grasa con parte cristalizada y con membranas débiles son expuestos a un tratamiento mecánico fuerte. La baja estabilidad de la emulsión de nata es responsable de algunos defectos de la nata batida tales como lipolisis, reducción en su capacidad de batido y formación de grandes grumos en los envases.

Fig. 8.5 *Línea de producción de nata para montar de acuerdo con el método Scania.*
1. Tanque de mantenimiento
2. Bomba de producto
3. Pasteurizador
4. Bomba de refuerzo
5. Tubo de mantenimiento
6. Tanques de maduración
7. Bomba de producto



La Figura 8.5 muestra un proceso donde se tiene especial cuidado en evitar tratamientos inadecuados de la nata para montar. Este método desarrollado por Alfa Laval en colaboración con varias industrias lácteas cooperativas suizas se denomina método Scania. La nata normalizada puede haber sido obtenida en una línea especialmente diseñada para ello, o puede tratarse de nata excedente procedente de una linea de tratamiento de leche para consumo, como la que se muestra en la Figura 8.1. En cualquier caso, la temperatura de separación o desnatado debe ser de 62-64ºC, con objeto de garantizar la más alta calidad posible para la nata (con la menor cantidad posible de grasa libre).

La nata normalizada se alimenta a la línea desde un depósito de mantenimiento o pulmón (1) a la temperatura de separación. El tiempo óptimo de mantenimiento en este depósito es de 15-30 minutos, antes de que comience la pasteurización. El caudal de pasteurización debe ser muy parecido al caudal medio de entrada al tanque de mantenimiento anterior. Esto hace posible reunir la nata sobrante o excedente en el tanque de mantenimiento durante cierto periodo de tiempo, asegurando una agitación mecánica mínima de la nata.

El tanque de mantenimiento no tiene agitador, de forma que aproximadamente el 50% del aire contenido en la nata se elimina aquí de forma natural, al mismo

tiempo que se eliminan también los sabores volátiles anormales. Con la eliminación de aire se disminuye el riesgo de formación de incrustaciones en el pasteurizador. El mantenimiento de la nata a unos 63ºC en este tanque de mantenimiento inactiva la mayor parte de las enzimas lipásicas y detiene la hidrólisis de la grasa libre. El tiempo máximo de mantenimiento, incluyendo el llenado y el vaciado, debe ser unas cuatro horas. Para tiempos de producción más largos, se deben instalar dos tanques de mantenimiento de forma que se utilizarán de forma alternativa. Se realizará la limpieza intermedia de uno de los tanques mientras que el otro está en uso.

Desde el tanque de mantenimiento, la grasa se bombea hasta la sección regenerativa de calentamiento del intercambiador de calor (3). La bomba de refuerzo (4) envía la nata a través de la sección de calentamiento y del tubo de mantenimiento (5). Como el bombeo se realiza cuando la nata está a una temperatura alta (a unos 60ºC), cuando la nata es menos sensible al tratamiento mecánico, tanto la bomba de producto (2) como la bomba de refuerzo (4) pueden ser del tipo centrífugo.

Después de la pasteurización, realizada normalmente a temperatura superior a 80-90ºC y durante unos 10 segundos, la nata se bombea a las secciones de enfriamiento del intercambiador de calor, donde se baja su temperatura hasta 8ºC en la sección de enfriamiento final, antes de pasar a los tanques de maduración (6). El enfriamiento en el intercambiador de calor hasta una temperatura media de 8ºC parece ser el óptimo para una nata con un contenido graso de 35-40%. Cuanto mayor sea el contenido de grasa mayor ha de ser la temperatura final de enfriamiento, para prevenir la formación de grumos de grasa en la sección de enfriamiento debido al incremento rápido de viscosidad que se produce. Esto produce un gran aumento de la pérdida de carga en la sección de enfriamiento, que a su vez provoca un deterioro de los glóbulos de grasa e incluso fugas de aceite de mantequilla en esa sección. En este caso se ha de detener el proceso, enjuagar el sistema, limpiar y volver a comenzar.

Debido a la inestabilidad de los glóbulos de grasa recién enfriados, se debe evitar durante su transporte los fenómenos de cizallamiento y turbulencia, es decir, no se deben utilizar bombas ni tuberías infradimensionadas para el paso desde la sección de enfriamiento del intercambiador de calor hasta el depósito de proceso para enfriamiento final y cristalización de la grasa. La presión para este transporte debe haber sido creada por la bomba de refuerzo ya mencionada..

Después de su maduración, la nata se bombea a las máquinas de envasado. La temperatura ahora es baja, y la mayor parte de la grasa de la leche se encuentra cristalizada, lo que significa que la nata es menos sensible al tratamiento mecánico. Se puede utilizar una bomba centrífuga con variador de velocidad para vencer pequeñas pérdidas de carga, de hasta 1.2 bar, estando también integrado en el sistema un transmisor de presión. Las bombas de rotor lobular que funcionan a una velocidad máxima de 250-300 rpm se recomiendan para pérdidas de presión de 1.2 - 2.5 bar, y hasta 3 bar.

Nata ligera

La nata que contiene 10-18% de grasa se denomina nata ligera o crema de café.

La Figura 8.6 muestra una línea de proceso para la producción de nata ligera. La leche sin tratar procedente de los depósitos de almacenamiento se calienta de forma regenerativa en el intercambiador de calor hasta alcanzar la temperatura de desnatado, es decir, 62-64ºC. La leche pasa entonces a la desnatadora para separar la leche desnatada y la nata con el contenido graso deseado, que normalmente es del 35-40%.

El tratamiento de la nata es el mismo que el descrito para la nata montada, con la excepción de que la nata ligera se mezcla con leche desnatada para conseguir el contenido graso buscado. A continuación, la nata ligera se homogeneiza.

La mezcla de nata y leche desnatada se efectúa por medio de una bomba dosificadora que inyecta la leche en la línea de nata. A continuación, se ajusta la temperatura de la nata a la de homogeneización y se procede a efectuar esta operación.

Después de la homogeneización, la nata vuelve al intercambiador de calor, donde se pasteuriza a 85-90ºC durante 15-20 segundos antes de proceder a su enfriamiento a unos 5ºC y a su envasado posterior.

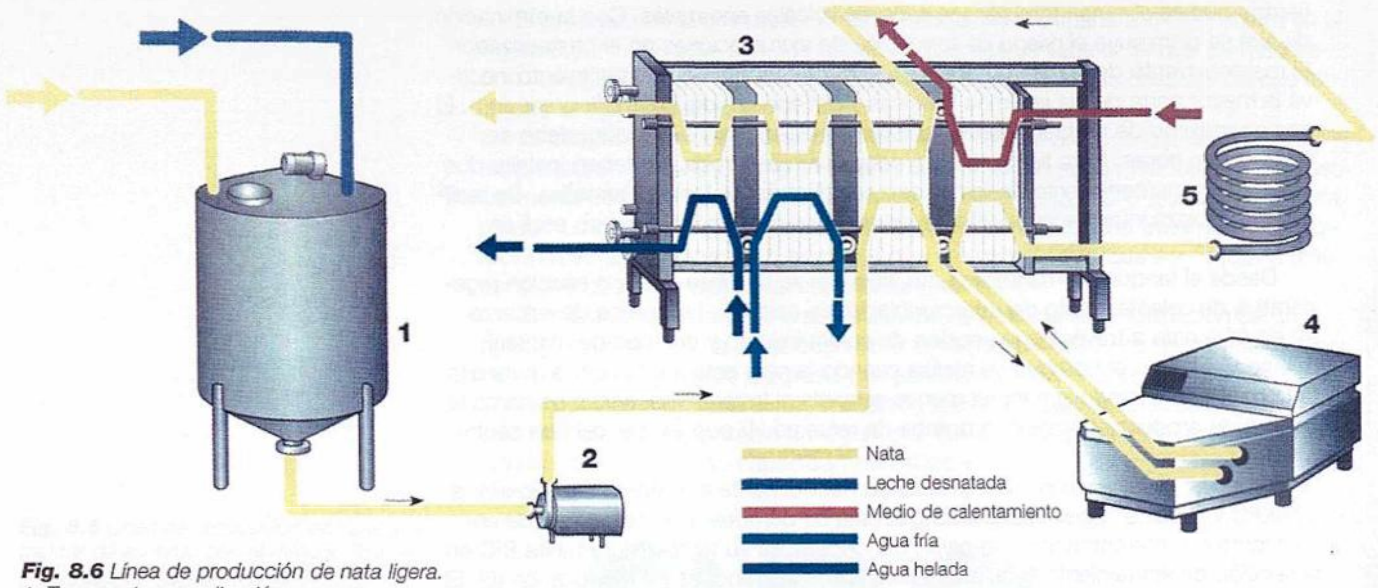


Fig. 8.6 *Línea de producción de nata ligera.*
1. Tanque de normalización en grasa
2. Bomba de producto
3. Intercambiador de calor de placas
4. Homogeneizador
5. Tubo de mantenimiento

Se deben cumplir dos requisitos imprescindibles en la producción de nata ligera:

- La nata debe ser viscosa, ya que esto crea una impresión más atractiva en el consumidor.
- La nata debe tener una buena estabilidad en el café. No debe flocular cuando se echa en café caliente.

Tabla 8.3
Test de viscosidad; incremento de la presión de homogeneización a 57°C.

Presión de homogeneización MPa	Viscosidad de la nata segundos
10	18
15	28
20	45

La nata con un bajo contenido en grasa tiene una viscosidad relativamente baja y no tiene la consistencia normalmente deseada por los consumidores. Es necesario seleccionar correctamente la temperatura y presión de homogeneización con objeto de obtener una nata con la viscosidad adecuada.

La viscosidad de la nata aumenta con la presión de homogeneización y disminuye con el aumento de la temperatura. La viscosidad de la nata de la Tabla 8.3 se puede conseguir manteniendo la temperatura de homogeneización de forma constante a unos 57°C y homogeneizando a tres presiones diferentes: 10, 15 y 20 MPa (100, 150 y 200 bar). La viscosidad se mide con un viscosímetro SMR, descrito en el capítulo 11, Productos lácteos acidificados. Cuanto más tiempo en segundos tarde la nata en fluir por el viscosímetro, mayor es su viscosidad. La nata que ha sido homogeneizada a 20 MPa es la de mayor viscosidad.

La Tabla 8.4 muestra la viscosidad al variar la temperatura de homogeneización manteniendo constante la presión de homogeneización de 15 MPa.

La viscosidad de la nata disminuye al aumentar la temperatura de homogeneización, por lo tanto, ésta debe ser la más baja posible. Sin embargo, si se quiere

Tabla 8.4
Test de viscosidad; efecto de la temperatura de homogeneización a 15 Mpa.

Temperatura de homogeneización °C	Viscosidad de la nata segundos
35	49
50	35
65	10

conseguir el efecto de homogeneización, la grasa debe estar líquida. Ello quiere decir que la temperatura de homogeneización no debe ser inferior a 35ºC.

La estabilidad de la nata en el café puede verse afectada considerablemente por las condiciones de homogeneización -temperatura, presión y posición del homogeneizador (antes o después del intercambiador de calor).

Esta estabilidad de la nata en el café puede mejorarse hasta cierto punto mediante la adición de bicarbonato sódico (como máximo a un 0.02%), si está permitido legalmente. Es un tipo de estabilidad térmica que plantea cierta complejidad, ya que depende de factores tales como:

- Temperatura del café. Cuanto más caliente se encuentre, más fácilmente floculará la nata.
- El tipo de café y el modo de su preparación. Cuanto más ácido sea, mayores posibilidades habrán de que flocule la nata.
- La dureza del agua utilizada en la preparación del café. La nata floculará más rápidamente con agua dura que con agua blanda, ya que las sales de calcio aumentan las posibilidades de coagulación de las proteínas.

Envasado

Las funciones principales del envasado son:

- facilitar la distribución eficiente del alimento
- mantener una adecuada higiene en el producto
- proteger los nutrientes y el sabor
- reducir el deterioro del alimento y por lo tanto los desperdicios
- incrementar la disponibilidad del alimento
- mostrar información sobre el producto

Funciones del envasado:

- permitir una distribución eficiente del alimento
- mantener la higiene del producto
- proteger los nutrientes y el gusto
- reducir el deterioro del alimento y los desperdicios del mismo
- incrementar la disponibilidad del alimento
- mostrar información del producto

El envasado de la leche en botellas de cristal fue introducido a comienzos de este siglo XX. Como envase, la botella de cristal tiene varios inconvenientes. Es relativamente pesada y frágil, y debe lavarse antes de su reutilización, lo que lleva consigo distintos problemas en las centrales lecheras. Desde 1960 se han ido introduciendo otros envases para la leche de consumo, principalmente los envases de cartón, aunque también las botellas y las bolsas de plástico.

Un envase debe proteger al producto y mantener su valor nutritivo durante la distribución hasta llegar al consumidor. Los alimentos líquidos tienden a ser más perecederos, por lo que es esencial que el envase esté perfectamente limpio. El envase también debe proteger al producto de los golpes mecánicos, de la luz y del oxígeno. La leche es un producto sensible: su exposición a luz artificial o natural destruye algunas vitaminas esenciales y tiene un efecto perjudicial sobre el gusto de la leche (ver la Tabla 8.2).

Otros productos, como los batidos, contienen productos saborizantes o vitaminas que son sensibles frente al oxígeno. El envase, por tanto, debe excluir el oxígeno.

Un paquete de leche normalmente está formado por capas de cartón y plástico (polietileno). El cartón se fabrica a partir de la madera, que es un recurso renovable. El cartón comunica robustez al envase así como resistencia a esfuerzos mecánicos. El cartón también actúa como barrera frente a la luz.

La fina lámina de polietileno alimentario colocada sobre la parte interior del cartón hace que el paquete sea impermeable y no hayan fugas de leche. La capa de plástico colocada sobre la cara exterior del cartón protege a éste de las condensaciones que se producen cuando se sacan los paquetes de leche fría del almacenamiento.

Debido a su pureza, este polietileno produce un impacto mediambiental mínimo cuando se incinera o se utiliza como material de relleno de terrenos que luego se pueden repoblar con árboles.

En productos de larga duración sin refrigeración y productos muy sensibles, se suele colocar una lámina delgada de aluminio entre las capas de polietileno, a modo de sandwich. Esto proporciona una protección más completa del producto frente a la luz y al oxígeno atmosférico.

Todos los envases terminan siendo vertidos. El creciente volumen de residuos domésticos es un grave problema mediambiental de nuestra sociedad. A continuación se resumen las formas de paliar este problema, agrupadas en cinco puntos:

- **Reducción.** Reduciendo el gasto de materias primas y eligiendo materiales que no sean dañinos para el medio ambiente ayudará a conservar los recursos naturales.
- **Reciclado.** Los envases se pueden recoger tras su uso y ser utilizados de nuevo. Sin embargo, hay que tener en cuenta que un envase incluso siendo reutilizado finalmente acaba siendo vertido.
- **Recuperación de materiales.** Los envases se pueden recoger después de ser utilizados y emplear los materiales de construcción de estos envases para la fabricación de nuevos productos, pero es importante que los nuevos productos satisfagan una necesidad real.
- **Recuperación de energía.** Todos los envases incorporan energía, que puede ser extraida cuando se incineran. El poder calorífico depende del tipo de material del envase.
- **Utilización como relleno.** Los residuos se pueden depositar como material de relleno en terrenos que luego se pueden repoblar de árboles para ser destinados a zonas de recreo o para otros usos.

Los envases de cartón tienen un peso muy bajo, y su componente principal proviene de un recurso renovable. Comparado con la mayoría de los demas envases, la cantidad de residuos generados es relativamente pequeña. Un envase Tetra Brik de un litro pesa 27 g y genera sólo esta cantidad de residuo.

Los envases de cartón son muy interesantes para recuperación de energía. La madera y el aceite (la materia prima del plástico) son fuentes convencionales de energía, y se puede decir que se utilizan estos materiales como envases antes de ser utilizados como combustibles. La incineración de dos toneladas de estos envases genera tanta energía como una tonelada de fuel.

La utilización de los envases vertidos como material de relleno de terrenos es la forma menos efectiva de gestión de los residuos. Sin embargo, si los envases Tetra Brik se depositan de esta manera, no contienen sustancias tóxicas que pudieran contaminar las aguas subterráneas.

Capítulo 9

Leche de larga duración

La esterilización de un producto implica someterlo a un tratamiento térmico tal que sean inactivados todos los microorganismos y los enzimas resistentes al calor presentes en el mismo. Los productos esterilizados suelen tener un excelente comportamiento en cuanto a mantenimiento de su calidad, que pueden mantener durante un periodo de tiempo bastante largo a temperatura ambiente. Por ello, muchas industrias lácteas pueden distribuir sus productos esterilizados a grandes distancias, y ganar así nuevos mercados.

Un producto que puede almacenarse durante largos períodos de tiempo sin estropearse y sin necesidad de refrigeración, ofrece muchas ventajas tanto para el fabricante, como para el vendedor detallista y el consumidor. El productor puede, por ejemplo, alcanzar mercados más amplios y más alejados geográficamente, simplificar sus entregas, utilizar vehículos de distribución más baratos y eliminar el retorno de productos no vendidos. El manejo se simplifica para el detallista, que no necesita vitrinas refrigeradas, y puede simplificar su plan de almacenamiento.

Finalmente, el consumidor gana en comodidad ya que puede ir pocas veces a comprar, tendrá menos congestión en los frigoríficos domésticos y tendrá reservas de emergencia suficientes para hacer frente a invitados inesperados. Estos incluyen productos caros como nata, postres y salsas.

Calidad de la materia prima

La leche no es adecuada para el tratamiento UHT si:
- esta acidificada
- tiene un inadecuado balance de sales
- contiene demasiadas seroproteinas - lo que es típico en el calostro

La leche que va a ser expuesta a alta temperatura debe ser de *muy buena calidad*. Es particularmente importante que las proteinas de la leche cruda no causen inestabilidad térmica. La estabilidad térmica de las proteinas puede ser rápidamente determinada mediante la prueba del alcohol. Cuando se mezclan muestras de leche con volúmenes iguales de una solución de alcohol etílico las proteinas se inestabilizan y la leche flocula a cierta concentración. Cuanto mayor es la concentración de la solución de alcohol etílico sin provocar floculación, mejor es la estabilidad térmica de la leche. Los problemas de producción y de vida útil normalmente se pueden evitar si la leche permanece estable a una concentración de alcohol del 75%.

La prueba del alcohol se utiliza para rechazar toda aquella leche que no es adecuada para su tratamiento UHT por:
- ser ácida, debido a un elevado recuento de bacterias (microorganismos productores de ácido),
- tener un equilibrio salino inaceptable,
- contener demasiadas seroproteinas, típicas de la leche calostral.

Una leche cruda de mala calidad tendrá efectos negativos sobre las condiciones de proceso y sobre la calidad del producto acabado. La leche ácida tiene una pobre estabilidad térmica, y causa problemas de proceso, como por ejemplo quemado sobre las superficies de intercambio que dan lugar a cortos tiempos de trabajo y dificultades con la limpieza, así como sedimentación de proteinas en el fondo de los envases durante el almacenamiento.

La leche almacenada durante mucho tiempo a baja temperatura puede contener un elevado número de bacterias psicrotróficas que pueden producir enzimas resistentes al calor que no se inactivan completamente durante la esterilización. Durante el almacenamiento pueden causar cambios de gusto tales como enranciamiento, amargor o incluso problemas de gelificación (espesamiento por envejecimiento o cuajado dulce).

La calidad bacteriológica de la leche debe ser también alta. Esto se aplica no sólo al recuento bacteriano total sino también, que es incluso más importante, al recuento de esporas procedentes de bacterias formadoras de esporas que influyen sobre la eficiencia de la esterilización.

Eficiencia de la esterilización

Cuando los microorganismos y/o las esporas se someten a un tratamiento térmico o a cualquier otro tipo de procedimiento de esterilización/desinfección, no todos los microorganismos son destruidos de una vez. De esta manera, en un período de tiempo determinado cierta proporción de microrganismos es destruida mientras que una parte sobrevive. Si los microorganismos supervivientes son una vez más sometidos al mismo tratamiento durante el mismo tiempo, una proporción similar de microrganismos se destruirá, y así sucesivamente. En otras palabras, una exposición determinada al proceso de esterilización o a agentes desinfectantes siempre matará la misma proporción de microorganismos presentes, pero siempre quedará una parte que sobrevivirá.

Reducción logarítmica de esporas

El efecto letal de la esterilización sobre los microorganismos puede expresarse matemáticamente como una función logarítmica como la que se muestra al margen del texto.

$$K + t = \log N/N_t$$

donde
N = número de microorganismos (esporas) originalmente presentes,
N_t = número de microorganismos (esporas) presentes tras un determinado tiempo de tratamiento (t), y
K = una constante
t = tiempo de tratamiento

Esta fórmula se representaría como una línea recta cuando se dibuja sobre una gráfica semilogarítmica, con el tiempo de tratamiento indicado en el eje horizontal lineal y el numero de supervivientes sobre el eje vertical logarítmico.

¡Una función logarítmica nunca puede ser cero! Lo que, dicho en otras palabras, significa que la esterilidad definida como ausencia de esporas bacterianas vivas en un volumen ilimitado de producto es imposible de conseguir. Más que tratar de aspectos imposibles y que no pueden ser determinados bajo condiciones prácticas, se ha de centrar el análisis en un concepto más abordable y realista. El "efecto esterilizante" o "eficiencia de la esterilización" es tal concepto. Estos términos expresan el número de reducciones decimales en recuento de esporas de bacterias conseguidas por un proceso de esterilización.

¡Una función logarítmica nunca puede alcanzar el cero!

Cada vez que se realiza un proceso de esterilización, éste puede ser caracterizado por un cierto efecto esterilizante. En cualquier proceso de esterilización por calor, el efecto de esterilización se determina por medio de las condiciones tiempo/temperatura aplicadas. Cuanto mayor es la temperatura y más largo el tiempo de mantenimiento, más eficiente será el proceso, y mayor el efecto esterilizante.

Cuanto más alta es la temperatura y mayor el tiempo de mantenimiento, más eficiente será el proceso, es decir mayor será el efecto de esterilización.

El efecto esterilizante se expresa por el número de reducciones decimales conseguidas en el proceso. Por ejemplo, un efecto esterilizante de 9 indica que de 10^9 esporas bacterianas que se tenían al inicio del proceso, sólo 1 (100) sobrevivirá. El efecto esterilizante es independiente del volumen.

$$\log 10^9 - \log 10^0 = 9 - 0 = 9$$

Las esporas de *Bacillus subtilis* o *Bacillus stearothermophilus* se utilizan generalmente como organismos de test para determinar el efecto esterilizante del equipamiento UHT, ya que estas cepas -especialmente B. *stearothermophilus*- forman esporas muy resistentes al calor.

El Clostridium botulinum se utiliza para el cálculo del efecto de la esterilización del producto envasado.

El equipo de esterilización en continuo (tratamiento UHT) normalmente tiene un efecto esterilizante de 10 a 12 cuando se evalua con esporas de B. subtilis y alrededor de 8 cuando se realiza el test con B. *stearothermophilus*. El efecto de la esterilización del producto envasado no debe ser inferior a 12 cuando se utiliza *Clostridium botulinum*.

Obviamente, el efecto de esterilización depende de:

- La combinación tiempo/temperatura.
- La resistencia al calor de las esporas utilizadas en el test, que a su vez se ve influida por la cepa usada de Bacillus y de la forma en la que se producen las esporas.
- El producto con el que se lleva a cabo el tratamiento térmico.

El efecto letal sobre las esporas de bacterias comienza a una temperatura cercana a 115°C y se incrementa muy rapidamente con el aumento de temperatura. Las bacterias se pueden dividir en dos grupos:

1. Las que existen sólo como células vegetativas (fáciles de matar con calor u otros medios).

2. Y las que existen en estado vegetativo y como esporas, por ejemplo las bacterias formadoras de esporas. Aunque estas bacterias se inactivan facilmente cuando están en forma vegetativa, sus esporas son difíciles de eliminar.

Los productos que se van a esterilizar normalmente contienen una flora que es una mezcla tanto de células vegetativas como de esporas bacterianas, tal como se muestra en la Figura 9.1. Desafortunadamente, la correlación entre ambas formas no es muy buena. Se pueden tener elevados recuentos de esporas en productos con un recuento total bajo, y viceversa. De esta forma, el simple recuento no puede servir como base fiable para determinar el número de esporas existente en un determinado producto alimenticio.

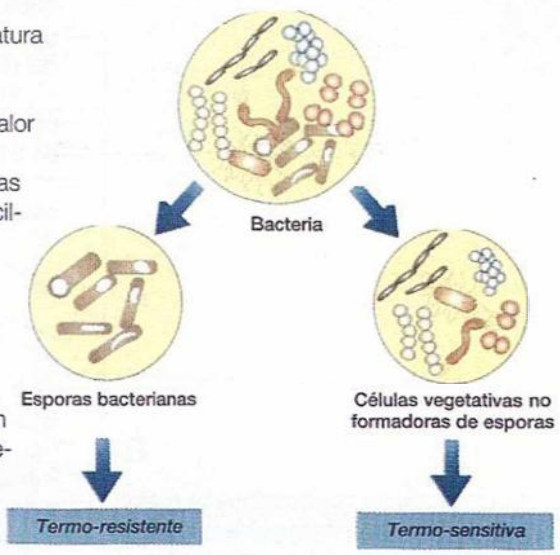


Fig. 9.1 *Impacto térmico sobre las bacterias según sus diferentes estados.*

Valor Q_{10}

Tal como se ha indicado anteriormente, el efecto esterilizante de un proceso de esterlización por calor se incrementa rápidamente conforme aumenta la temperatura. Esto, desde luego, se aplica también a las reacciones químicas que ocurren como consecuencia del tratamiento térmico. El valor Q_{10} se ha introducido como

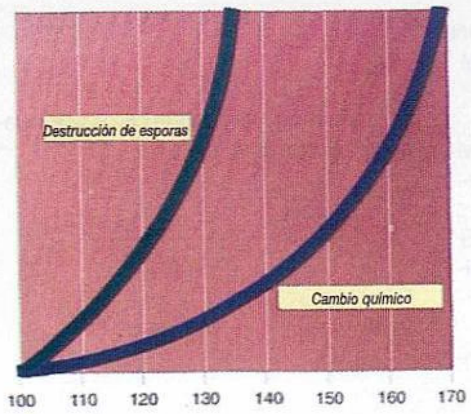


Fig. 9.2 *Curvas què representan la velocidad de cambio en las propiedades químicas y la velocidad de destrucción de esporas con el incremento de la temperatura.*

una expresión de este incremento de velocidad de reacción. Indica cuántas veces se incrementa la velocidad de reacción si la temperatura del sistema se aumenta 10°C.

El valor Q_{10} para los cambios de sabor -y para la mayoría de las reacciones químicas- es alrededor de 2-3. Por ejemplo, si la temperatura de un sistema se aumenta 10°C, la velocidad de las reacciones químicas se dobla o triplica. Los valores Q_{10} también se pueden determinar por el nivel de eliminación de esporas bacterianas. Los valores encontrados oscilan entre 8 y 30. La variación es tan amplia debido a los diferentes tipos de esporas bacterianas que reaccionan de manera distinta frente a incrementos de temperatura. Los cambios en las propiedades químicas y la destrucción de esporas por la influencia del incremento de temperatura se muestran en la Figura 9.2.

Valor F_0

En este contexto es interesante mencionar que la conexión entre el tiempo y la temperatura de esterilización también se expresa como un valor F_0 de acuerdo con la siguiente función logarítmica:

$$F_0 = \frac{t}{60} \times 10^{\frac{T-121.1°C}{z}}$$

donde
t = tiempo de esterilización, en segundos, a T°C
T = temperatura de esterilización, en °C
z = un valor que expresa el incremento de temperatura necesario para obtener el mismo efecto letal en la décima parte (1/10) del tiempo. El valor varía según el origen de las esporas (10-10.8°C) y normalmente se puede fijar como 10°C.

Si la fórmula se expresa en °F, la temperatura de referencia es de 250°F y el valor de z normalmente es 18°F.

F_0 = 1 una vez que el producto se ha calentado a 121.1°C durante un minuto. Para obtener una leche comercialmente estéril a partir de una leche cruda de buena calidad se necesita un valor F_0 como mínimo de 5 - 6.

Valores B* y C*

El rango de trabajo efectivo de los tratamientos UHT también se define en algunos paises con referencia a dos parámetros, que son:

Efecto bacteriológico: B* (conocido como B asterisco)
Efecto químico: C* (conocido como C asterisco)

B* se basa sobre la asunción de que la esterilidad comercial se consigue a 135°C durante 10.1 segundos con un correspondiente valor z de 10.5°C. A este proceso de referencia se le da un valor B* de 1.0, que representa una reducción del recuento de esporas termófilas de 10^9 por unidad.

El valor C* se basa sobre las condiciones de destrucción del 3% de tiamina por unidad. Esto es equivalente a 135°C durante 30.5 segundos con un valor de z de 31.4°C.

Un proceso UHT opera satisfactoriamente con respecto al mantenimiento de la calidad del producto cuando se cumplen las siguientes condiciones:

$$B^* > 1$$
$$C^* < 1$$

Un producto comercialmente estéril está libre de microorganismos que crecen en condiciones normales.

"La partícula más rápida"

En algunos paises (especialmente en los Estados Unidos), se presta especial atención al tiempo de residencia en la célula o tubo de mantenimiento, con especial referencia al tiempo de mantenimiento de la "partícula más rápida". Dependiendo del modelo de flujo del líquido (flujo laminar o turbulento) el coeficiente de eficiencia para la leche es de 0.85-0.9. Esto implica la aplicación de un factor de corrección en el cálculo de los tiempos de mantenimiento. En casos especiales, en los Estados Unidos se estima que la partícula más rápida pasa por la célula de mantenimiento dos veces más rápida que la partícula de velocidad media. Por lo tanto el coeficiente de eficiencia (η) sería de 0.5 - 0.85.

Esterilidad comercial

Es frecuente encontrar la expresión "esterilidad comercial", sobre todo para los productos tratados con el método UHT. Un producto comercialmente estéril se define como aquel que está libre de microorganismos que crecerían en las condiciones dominantes.

Las gráficas de las Figuras 9.3 y 9.4 muestran las curvas tiempo/temperatura para los dos sistemas de esterilización por calor utilizados con más frecuencia.

Las figuras también muestran que mientras que el tiempo de esterilización de envases con producto no estéril se expresa en minutos, el tiempo correspondiente para el tratamiento UHT se mide en segundos.

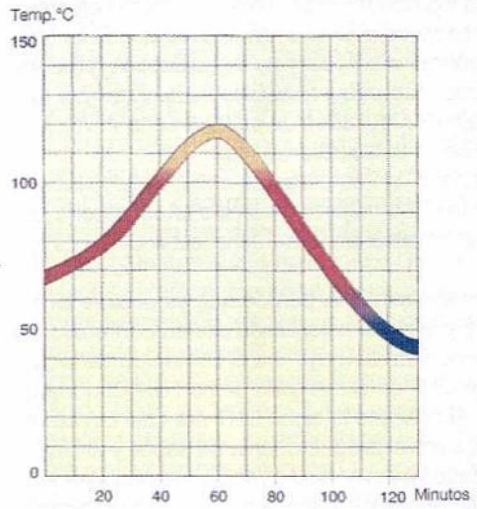


Fig. 9.3 *Curva de temperatura para la esterilización del producto envasado.*

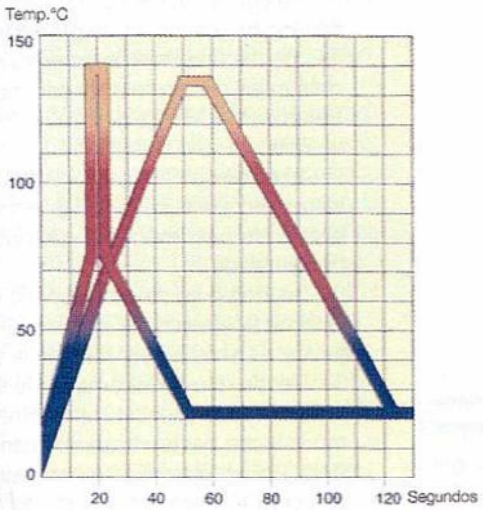


Fig. 9.4 *Curvas de temperatura para los tratamientos UHT directo e indirecto.*

Cambios químicos y bacteriológicos en un tratamiento térmico intenso

Cuando la leche se mantiene a una temperatura elevada durante mucho tiempo se forman ciertos productos fruto de diversas reacciones químicas, que dan lugar a una alteración del color (oscurecimiento). También adquiere un sabor a cocido y a caramelo, y a veces se forma cierta cantidad de sedimento. Estos defectos se evitan fácilmente mediante tratamiento térmico a una temperatura más elevada pero

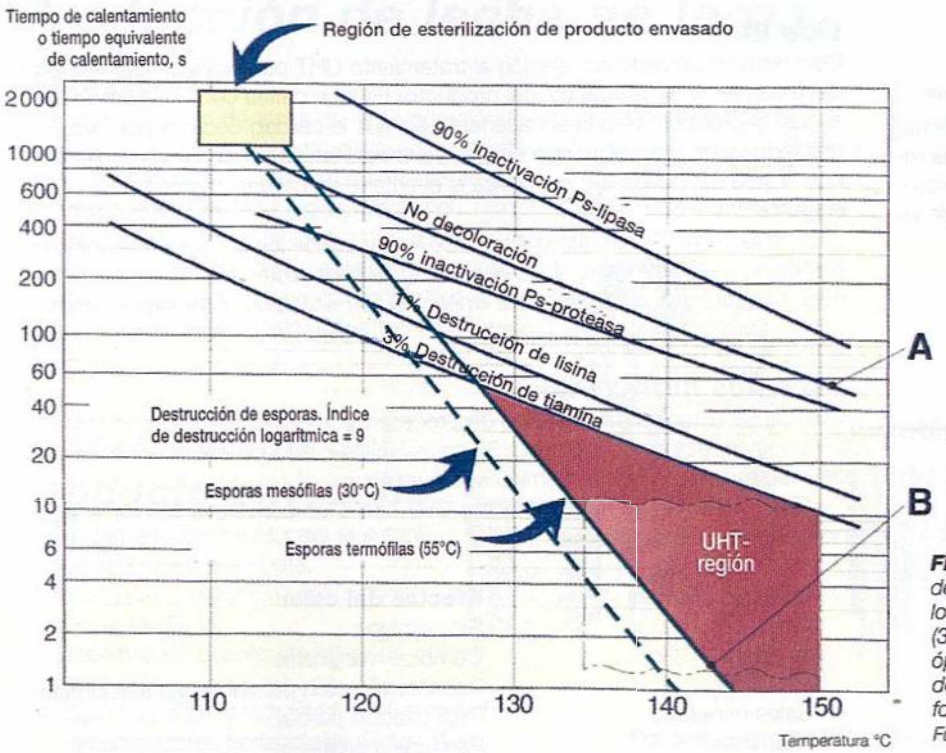


Fig. 9.5 *Líneas límite para la destrucción de esporas y efectos sobre la leche. Los valores comprendidos entre las líneas verdes (30°C y 55°C) expresan las temperaturas óptimas de crecimiento de los tipos vitales de los correspondientes microorganismos formadores de esporas.*
Fuente: Kessler

durante un tiempo más corto. Es importante que la combinación tiempo/temperatura sea elegida de manera que la destrucción de esporas sea satisfactoria y al mismo tiempo que el daño producido por el calor a la leche se mantenga al nivel más bajo posible.

La Figura 9.5 muestra la relación entre el efecto de esterilización y la reacción de oscurecimiento. La linea **A** representa el límite inferior de la combinación tiempo/temperatura que provoca que la leche se oscurezca. La linea **B** es el límite inferior de las combinaciones para una completa esterilización (destrucción de esporas termófilas). Las regiones para la esterilización de producto envasado y tratamiento UHT también se indican en esta figura.

La figura muestra que mientras los dos métodos tienen el mismo efecto de esterilización, se tiene una gran diferencia en cuanto a los efectos químicos (reacciones de oscurecimiento y destrucción de vitaminas y aminoácidos). A temperaturas más bajas las diferencias son mucho más pequeñas. Esta es la razón por la que el tratamiento UHT da lugar a los mejores resultados de sabor y tiene el valor nutritivo más elevado que cuando la leche se esteriliza envasada.

El **sabor** es un factor muy subjetivo, sin embargo se obtienen resultados muy claros de que el sabor de la leche UHT ha mejorado con los años. Mucha gente encuentra casi imposible diferenciar el sabor de una buena leche UHT y la leche pasteurizada.

Tal como se ha mencionado en el capítulo 2, parece que es posible diferenciar la leche pasteurizada, la leche UHT y la leche esterilizada por su contenido de lactulosa. Cuanto mayor ha sido la temperatura, mayor es el contenido de lactulosa.

Desde que se introdujo la leche UHT en el mercado se han discutido tanto la calidad como el sabor y el aroma. Al principio la leche UHT era casi tan blanca como la leche pasteurizada ordinaria, pero el producto tenía un sabor y aroma a cocido. Por este motivo se han realizado y aún se están realizando grandes esfuerzos para alcanzar un gusto más cercano al de la leche pasteurizada ordinaria.

En este contexto es importante decir que la temperatura a la que se evalua organolépticamente la leche tiene una gran influencia sobre el resultado. A una temperatura baja de 5 -7°C, el aroma de la leche UHT será practicamente anulado. Además, cuando se realiza por ejemplo la comparación de la influencia de varios métodos de tratamiento UHT, la evaluación organoléptica debe hacerse a 20°C en muestras que han sido almacenadas a 20°C durante distintos tiempos: 2, 4 y 6 semanas.

Los tests realizados de esta manera muestran que existen diferencias significativas entre los métodos directos e indirectos, ya que los últimos exponen a la leche a mayores cargas de temperatura. Sin embargo, no se tienen diferencias significativas entre los dos métodos directos.

Vida útil

Otro término utilizado en relación al tratamiento UHT para caracterizar la calidad del tratamiento es la vida útil del producto. Esta se define como el tiempo durante el cual el producto puede almacenarse sin que la calidad decaiga por debajo de un cierto valor aceptable, que sería el valor mínimo. El concepto es subjetivo, ya que la vida útil puede ser muy larga si el criterio de calidad de producto es poco exigente.

Los factores de tipo físico y químico limitantes de la vida útil son la incipiente gelificación, el incremento de la viscosidad, la sedimentación y la separación de la nata. Los factores organolépticos limitantes son el deterioro del sabor, aroma y color.

No se tienen cambios en el valor nutritivo de la grasa, lactosa y sales minerales, aunque se tienen cambios marginales en el valor nutritivo de las proteinas y las vitaminas.

Aspectos nutricionales

Cuando se estudia cualquier tipo de procesado de alimentos, es importante considerar los aspectos nutricionales. Se ha llevado a cabo una investigación extensiva del efecto del tratamiento térmico sobre la leche.

El efecto del calor del tratamiento UHT sobre los constituyentes de la leche se pueden resumir como sigue:

Constituyentes	**Efectos del calor**
Grasa	Sin cambios
Lactosa	Cambios marginales
Proteinas	Desnaturalización parcial de las seroproteinas
Sales minerales	Precipitación parcial
Vitaminas	Pérdidas marginales

De estos cambios químicos se pueden deducir ciertas conclusiones en cuanto a valor nutricional. No se tienen cambios en el valor nutritivo de la grasa, lactosa y sales minerales, pero se tienen ciertos cambios en el valor nutritivo de las proteínas y las vitaminas.

La proteína más importante de la leche, la caseína, no es afectada por el tratamiento térmico. La desnaturalización de las seroproteínas no quiere decir que el valor nutritivo de la leche UHT sea más bajo que el de la leche cruda. La estructura es menos compleja por lo que las enzimas en el estómago podrán atacar más fácilmente las proteínas.

La pequeña pérdida que se produce del aminoácido esencial lisina es la que provoca los cambios marginales. Sin embargo, se ha visto que sólo se pierde alrededor de un 0.4-0.8% de lisina, tanto en la leche UHT como en la pasteurizada. En el caso de la leche envasada esterilizada, este porcentaje llega a ser del orden de un 6-10 %.

Algunas de las vitaminas presentes en la leche son consideradas como termoestables en mayor o menor grado. Entre ellas tenemos las solubles en grasa, que son las vitaminas A, D y E, y las solubles en agua, B_2, B_3, biotina y ácido nicotínico (niacina). Otras vitaminas tales como la B_1 (tiamina) son menos estables al calor. La curva tiempo/temperatura mostrada en la Figura 9.5 indica que las pérdidas de tiamina son inferiores al 3% en la leche UHT, pero son considerablemente mayores en la leche esterilizada envasada (aproximadamente 20-50%). Se puede encontrar la misma proporción respecto a la destrucción de vitaminas en el caso de todas las vitaminas sensibles al calor, cuando se comparan los procesos UHT y de esterilización de la leche envasada (como es el caso de, por ejemplo, las vitaminas B_6, B_{12}, ácido fólico y vitamina C). Las pérdidas de vitaminas B_2, y C, cuando la leche se esteriliza envasada, pueden llegar a ser hasta del 100 %.

Algunas vitaminas (vitamina C y ácido fólico) son sensibles a la oxidación, pudiéndose producir pérdidas sobre todo durante su almacenamiento debido a un contenido alto de oxígeno en la leche o en el envase. Sin embargo, la leche no es una fuente importante de vitamina C y ácido fólico, ya que su contenido está muy por debajo de la ingestión diaria recomendada.

En general, las pérdidas de vitaminas son considerablemente mayores cuando el alimento se prepara en casa que cuando se trata por el sistema UHT o se pasteuriza. La conclusión global que se puede sacar es que la leche pasterizada y la leche UHT son de la misma calidad, mientras que la leche esterilizada envasada tiene una calidad inferior en lo que se refiere a su valor nutritivo.

Fig. 9.6 *Envase estático a presión (autoclave).*

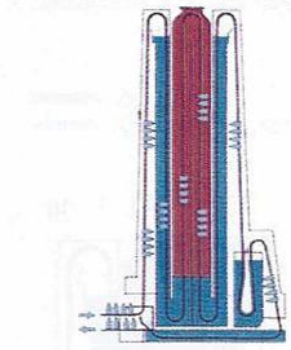


Fig. 9.7 *Esterilizador vertical o de torre.*

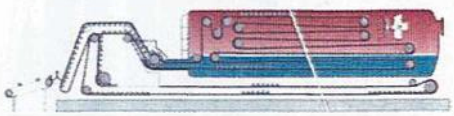


Fig. 9.8 *Esterilizador horizontal.*

Producción de leche de larga duración

Para la producción de leche de larga duración se utilizan dos métodos:

A Esterilización del producto envasado, calentándose el producto y el envase a unos 116ºC durante 20 minutos. Almacenamiento a temperatura ambiente.

B Tratamiento UHT (del inglés, Ultra High Temperature = Temperatura Ultra Alta), donde el producto se calienta a 135-150ºC durante 4-15 segundos seguido de un envasado aséptico en envases que protegen al producto frente a la luz y al oxígeno atmosférico. Almacenamiento a temperatura ambiente.

Esterilización del producto envasado

Se utilizan dos procesos para la esterilización en botella o en bote.

- Procesado discontinuo en autoclaves (Figura 9.6).
- Sistemas de procesado continuo como son las:
  - -torres verticales hidrostáticas (Figura 9.7)
  - -esterilizadores horizontales (Figura 9.8)

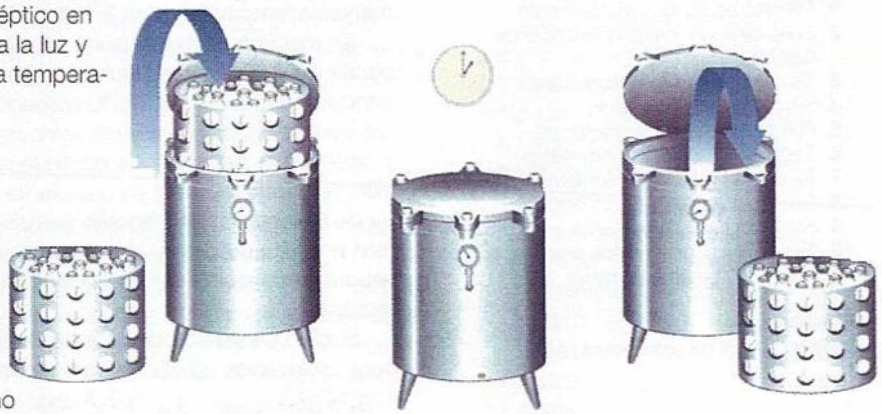


Fig. 9.9 *Procesado discontinuo en un envase estático a presión (autoclave).*

Procesado discontinuo

El sistema discontinuo puede utilizar tres métodos, llevándose a cabo la esterilización:

1. En pilas de jaulas en un envase estático a presión (autoclave, Figura 9.9).
2. En una jaula que puede rotar en el interior de un autoclave estático.
3. En un autoclave rotatorio.

Los métodos rotatorios tienen una ventaja sobre los métodos estáticos y es la mayor velocidad de transferencia de calor desde el medio de calentamiento y la mayor uniformidad de tratamiento con respecto a la eliminación de bacterias y al color del producto acabado.

En la esterilización de la leche en autoclaves, normalmente se precalienta a una temperatura de unos 80ºC y se llena en botellas limpias y calientes. Las botellas se tapan y se colocan en una cámara de vapor donde son esterilizadas a una temperatura de unos 110-120ºC durante 15-40 minutos. Pasado este tiempo, las botellas se enfrian y se sacan del autoclave, que se vuelve a llenar para repetir el proceso con nuevos envases. El principio de funcionamiento es el mismo que en la esterilización de conservas enlatadas.

La esterilización por cargas en autoclave es una técnica que se utiliza con más frecuencia en productos sólidos enlatados que en los líquidos. El hecho de que la esterilización se realice una vez que el producto está envasado (en botella o lata) elimina la necesidad del manejo en condiciones asépticas, pero, por otra parte, es necesario utilizar envases con materiales resistentes al calor.

Procesado continuo

Normalmente, se recomiendan los sistemas continuos cuando se van a producir más de 10.000 unidades por día. Para conseguir una operación continua, el diseño del equipo depende del uso de un sistema de cierre de presión a través del cual pasarán los envases llenos desde condiciones de baja presión/baja temperatura hasta la zona de relativamente alta presión y temperatura, tras la cual el producto se somete a un progresivo descenso de las condiciones de presión y temperatura, siendo a continuación enfriado con agua fría o agua helada.

Existen dos tipos principales de equipos en el mercado para la esterilización continua, diferenciándose básicamente en el sistema de cierre de presión.

1. Esterilizador hidrostático vertical, para botellas.
2. Esterilizador horizontal con válvula de cierre rotatoria.

Esterilizador hidrostático vertical

Este tipo de esterilizador, referido a menudo como esterilizador de torre (Figura 9.10), consiste básicamente en una cámara central que se mantiene a la temperatura de esterilización mediante vapor a presión, y que se mantiene equilibrada respecto de los lados de entrada y salida por medio de columnas de agua que proporcionan la presión interior equivalente. El agua en el lado de entrada está caliente, mientras que en el lado de descarga está fría, con la temperatura ajustada en cada caso para conseguir la máxima captación/disipación de calor, pero evitando la posibilidad de rotura del vidrio por choque térmico.

En la torre hidrostática, los envases llenos de leche son transportados lentamente a través de sucesivas zonas de calentamiento y de enfriamiento. Estas zonas se dimensionan de forma que se consigan las temperaturas y tiempos de mantenimiento requeridos en las distintas etapas de tratamiento.

En muchos casos, la leche se preesteriliza en una instalación similar a una planta UHT. Para ello la leche se calienta a 135ºC o más, durante unos pocos segundos y se enfría a 30-70ºC (dependiendo del material de la botella; si las botellas son de plástico requieren temperaturas menores) y se llena en botellas limpias y calentadas, para pasar a continuación a la torre hidrostática. Esta preesterilización se puede efectuar en una planta de tratamiento directo o indirecto. Esta etapa de tratamiento no necesita ser tan fuerte como cuando se efectúa la esterilización en una sola etapa, ya que su principal propósito es disminuir el número de esporas, con objeto de poder también bajar la carga térmica en la torre de calentamiento.

El ciclo de tiempo de un esterilizador hidrostático es aproximadamente de una hora, incluyendo 20-30 minutos de paso a través de la sección de esterilización a 115-125ºC.

El esterilizador hidrostático es recomendable para tratar térmicamente de 2.000 x 0.5 litros a 16.000 x 1 litro unidades por hora. Se pueden utilizar botellas tanto de plástico como de vidrio.

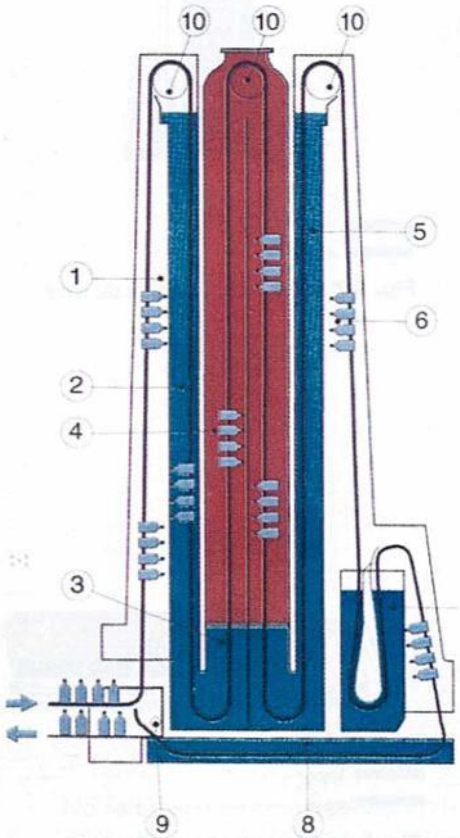


Fig. 9.10 *Esterilizador continuo hidrostático vertical, para botellas.*

1. *Primera etapa de calentamiento*
2. *Sello de agua y segunda etapa de calentamiento*
3. *Tercera etapa de calentamiento*
4. *Sección de esterilización*
5. *Primera etapa de enfriamiento*
6. *Segunda etapa de enfriamiento*
7. *Tercera etapa de enfriamiento*
8. *Cuarta etapa de enfriamiento*
9. *Etapa final de enfriamiento*
10. *Tambores superiores de arrastre, accionados independientemente.*

Vapor
Agua de enfriamiento

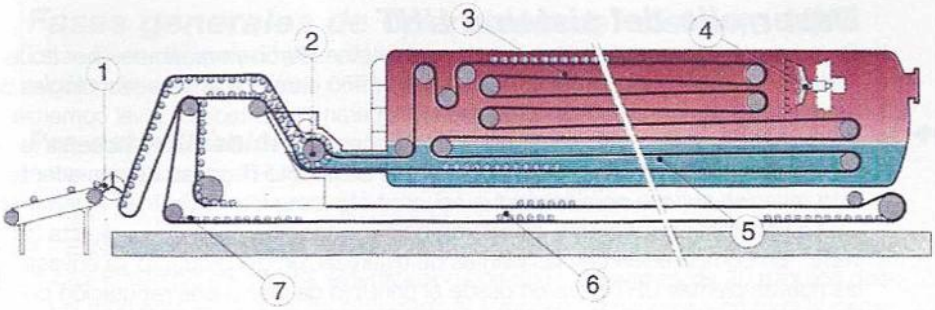


Fig. 9.11 *Esterilizador horizontal con cierre de válvula rotatoria y sistema de presurización positiva (mezcla vapor/aire).*
1. Carga automática de botellas o latas
2. La válvula rotatoria transporta botellas hacia dentro y hacia fuera de la cámara presurizada.
3. Area de esterilización
4. Ventilador
5. Area de pre-enfriamiento
6. Enfriamiento final a presión atmosférica.
7. Descarga de la cadena transportadora

Vapor
Agua de enfriamiento

Esterilizador horizontal

El esterilizador sellado con una válvula rotatoria (Figura 9.11) es un equipo comparativamente menos costoso de construir. Consta de una válvula rotatoria accionada mecánicamente, a través de la cual pasan los envases llenos de leche hasta una zona de relativamente alta presión y temperatura, donde se someten a temperaturas de esterilización del orden de 132-140ºC durante 10-12 minutos. Se puede conseguir una capacidad de 12.000 unidades por hora, con un tiempo de ciclo de 30-35 minutos.

Este esterilizador de válvula de cierre rotatoria se puede utilizar para la esterilización de botellas de plástico y botellas de vidrio así como para envases flexibles de película plástica y laminados plásticos.

Otro sistema que debe mencionarse en este apartado es el autoclave continuo horizontal rotatorio que se utiliza para la leche evaporada envasada en latas. El diseño del esterilizador comprende tres recipientes cilíndricos, conteniendo cada uno una banda helicoidal insertada a un rodillo interior. Además, se forman toda una serie de canales por lo que las latas son forzadas a avanzar a lo largo del rodillo durante el tratamiento al mismo tiempo que se mantienen en rotación. Este tipo de esterilizador está también equipado con un sistema detector doble que permite detectar latas no estériles: uno a la salida del precalentador y el otro al final del enfriador a presión.

Tratamiento UHT

En las modernas plantas UHT, la leche se bombea a través de un sistema cerrado. En el camino recorrido se procede de forma sucesiva a su precalentamiento, esterilización a alta temperatura, homogeneización, enfriamiento y envasado aséptico. Los productos líquidos de baja acidez (pH por encima de 4.5 -en la leche se tiene un pH de 6.5) se tratan normalmente a 135-150ºC durante unos pocos segundos, bien por calentamiento indirecto o por inyección directa de vapor o infusión. Los productos ácidos (con pH inferior a 4.5) como los zumos se calientan hasta 90-95ºC durante 15-30 segundos. Todos los componentes del sistema a la salida de la sección de esterilización deben ser de diseño aséptico para evitar el riesgo de reinfección.

En comparación con el sistema tradicional de esterilización en torres hidrostáticas, el tratamiento UHT de la leche ahorra tiempo, mano de obra, energía y espacio. El proceso UHT se caracteriza por su rapidez y por afectar de forma menos apreciable al sabor de la leche. Sin embargo, los clientes habituales de la leche esterilizada en autoclaves están acostumbrados a su típico sabor a "cocido" o caramelo y pueden encontrar a los productos UHT como faltos de sabor.

El proceso UHT

El tratamiento UHT es una técnica de conservación de los productos alimenticios líquidos que consiste en someterlos a una exposición calorífica breve pero intensa. Este tratamiento destruye los microorganismos existentes en el producto.

Una vez sometido a este tratamiento el producto debe permanecer en condiciones asépticas, ya que es necesario prevenir la reinfección. Para ello se envasa el producto en un envase previamente esterilizado, que una vez lleno y cerrado garantiza unas condiciones asépticas de conservación. Cualquier almacenamiento intermedio entre el tratamiento y el envasado debe tener lugar bajo condiciones asépticas. Esta es la razón por la que el procesado UHT se denomina también procesado aséptico.

Productos UHT comunes
- leche líquida y recombinada
- leche concentrada
- natas
- batidos
- productos lácteos fermentados (yogur, mantequilla, etc.)
- bebidas a base de lactosuero
- helados de crema
- postres (natillas y puddings)
- bebidas ricas en proteinas
- bebidas de soja
- alimentos infantiles
- zumos vegetales y de frutas
- bebidas tales como café y té
- recubrimientos y cremas a base de grasas vegetales
- sopas
- salsas
- purés
- condimentos
- soluciones nutritivas

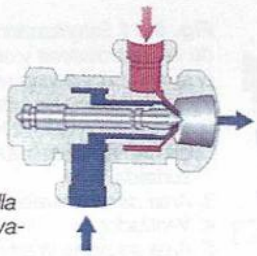


Fig. 9.12 *Boquilla de inyección de vapor.*

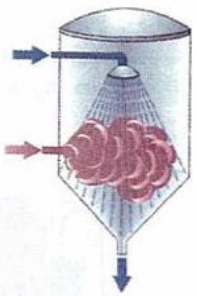


Fig. 9.13 *Recipiente de infusión de vapor.*

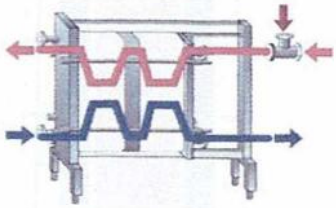


Fig. 9.14 *Intercambiador de calor de placas para calentamiento y enfriamiento.*

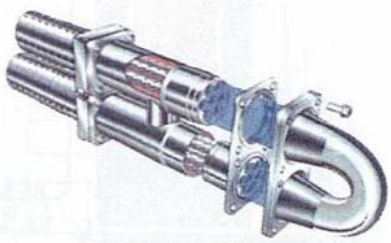


Fig. 9.15 *Intercambiador de calor tubular para calentamiento y enfriamiento.*

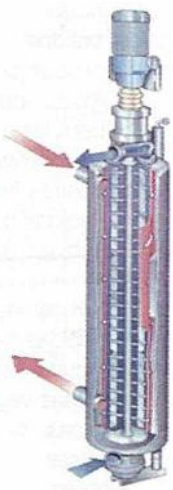


Fig. 9.16 *Intercambiador de calor de superficie rascada para calentamiento y enfriamiento.*

Desarrollo del sistema UHT

Experimentos de esterilización de leche en botellas fueron ya realizados por Louis Pasteur, pero hubo que esperar hasta el año 1960 para que ambas tecnologías de procesado aséptico y de envasado aséptico fueran implantadas a nivel comercial, dando lugar al desarrollo de los modernos procesos UHT. En la actualidad, la leche y otros productos líquidos tratados por el sistema UHT gozan de una aceptación mundial, aunque no siempre fue así.

Las primeras plantas UHT trabajaron bajo el principio de inyección directa de vapor. En comparación con las plantas de esterilización del producto ya envasado, las nuevas plantas UHT gozaron desde el principio de una buena reputación por dar lugar a productos con excelente sabor. Diez años más tarde se empezaron a introducir en el mercado las primeras plantas UHT de tipo indirecto.

La investigación y el desarrollo han sido muy fuertes desde la introducción de las primeras plantas UHT. Las modernas instalaciones son capaces de dar productos de alta calidad con su valor nutritivo y color prácticamente inalterados.

Plantas UHT

El tratamiento UHT es un proceso continuo, y su limitación de uso está en la posibilidad de que el producto pueda ser bombeado. El tratamiento UHT puede ser aplicado a un amplio rango de productos lácteos y alimenticios. La lista que se muestra al margen no es exhaustiva. Muchos otros productos alimenticios líquidos tendrán probablemente un gran interés en el futuro en las industrias lácteas.

Las plantas UHT son a menudo de diseño flexible para facilitar el procesado de un amplio abanico de productos en la misma planta. Tanto los productos de baja acidez (pH > 4.5) como los productos de alta acidez (pH < 4.5) se pueden tratar en una planta UHT. Sin embargo, sólo los productos de baja acidez requieren un tratamiento UHT para su esterilización comercial. Las esporas no se pueden desarrollar en los productos de alta acidez como los zumos. En estos casos, el tratamiento térmico sólo tiene la misión de eliminar las levaduras y los mohos. La pasteurización normal a elevada temperatura (90-95°C durante 15-30 segundos) es suficiente para hacer que los productos con elevada acidez sean comercialmente estériles.

Las plantas UHT están completamente automatizadas y tienen cuatro *modos de operación*: *preesterilización de la planta, producción, AIC* (del inglés Aseptic Intermediate Cleaning = Limpieza Intermedia Aséptica) y *CIP* (del inglés Cleaning in Place). Los aspectos de seguridad deben tener la máxima consideración en el diseño de la planta UHT. Se ha de eliminar el riesgo de suministro de un producto no estéril a la máquina de llenado aséptico. En la programación de control se han de prever dobles sistemas de seguridad para conseguir una gran seguridad frente a los errores del operador que deterioren el proceso. Por ejemplo, debe ser imposible comenzar la producción si la planta no está adecuadamente pre-esterilizada.

Todas la secuencias implicadas: puesta en marcha, funcionamiento y limpieza de la planta se inician desde el panel de control, que contiene todo el equipamiento necesario para control, monitorización y registro del proceso.

Sistemas de tratamiento UHT

En el mercado existen dos tipos principales de sistemas de tratamiento UHT.

En los **sistemas directos** el producto entra en contacto directo con el medio de calentamiento, y después sufre un enfriamiento flash en un depósito al vacio. A veces, se realiza posteriormente un enfriamiento indirecto hasta la temperatura de envasado. Los sistemas directos se dividen en:

- sistemas de inyección de vapor (el vapor es inyectado en el producto) (Figura 9.12)
- sistemas de infusión de vapor (el producto se introduce en un envase lleno de vapor) (Figura 9.13).

En los **sistemas indirectos** el calor es transferido desde el medio de calentamiento hasta el producto a través de una pared de separación (placa o pared tubular). Los sistemas indirectos pueden utilizar:

- intercambiadores de calor de placas, Figura 9.14
- intercambiadores de calor tubulares, Figura 9.15
- intercambiadores de calor de superficie rascada, Figura 9.16

Además, es posible combinar los intercambiadores de calor en los sistemas indirectos de acuerdo con el producto y las necesidades de proceso.

Fases generales de operación del sistema UHT

Estas fases de operación son comunes a todos los sistemas UHT, por lo que no se describen en el apartado correspondiente a cada sistema.

Pre-esterilización

Antes de la puesta en producción de la planta se debe pre-esterilizar con el fin de evitar la reinfección del producto tratado. La pre-esterilización implica:

- Esterilización con agua caliente, a la misma temperatura que se tratará al producto. El tiempo mínimo de esterilización con agua caliente es de 30 minutos desde el momento en que se ha alcanzado la temperatura necesaria en toda la parte aséptica de la planta.
- Enfriamiento de la planta hasta las condiciones requeridas de producción.

Producción

Las fases de producción varían de acuerdo con los diferentes procesos y se describen a continuación.

Limpieza aséptica intermedia

El ciclo completo de limpieza CIP necesita de 70 a 90 minutos y normalmente se lleva a cabo inmediatamente después de la producción. La limpieza intermedia aséptica (AIC, Aseptic Intermediate Cleaning) es una herramienta muy útil en los casos en que se utilice una planta durante tiempos de funcionamiento muy largos. Una limpieza AIC de 30 minutos se puede llevar a cabo cuando sea necesario eliminar suciedad de la linea de producción sin perder las condiciones asépticas. La planta no se tiene que re-esterilizar tras una limpieza AIC. Este método ahorra tiempos muertos y permite ciclos de producción más largos.

CIP

El ciclo CIP de las plantas UHT directas o indirectas puede comprender secuencias de pre-enjuagado, limpieza con sosa, enjuagado con agua caliente, limpieza con un agente ácido, y un enjuagado final, todo controlado automáticamente de acuerdo con un programa pre-establecido de temperaturas y tiempos. El programa CIP se debe optimizar de acuerdo con las diferentes condiciones de operación de las distintas industrias lácteas.

Planta UHT de tratamiento directo basada en la inyección de vapor y con intercambiador de calor de placas

En el diagrama de flujo de la Figura 9.17 el producto a unos 4°C se suministra desde el tanque pulmón (1) y se envía por medio de la bomba de alimentación (2) hasta la sección de precalentamiento del intercambiador de calor de placas (3). Tras el precalentamiento hasta aproximadamente 80°C la presión del producto se incrementa por medio de la bomba (4) hasta unos 4 bar y el producto entonces continua hasta el inyector de vapor de boquilla de anillo (5). El vapor inyectado en el producto aumenta instantáneamente la temperatura del producto hasta unos 140°C (la presión de 4 bar impide que el producto entre en ebullición). El producto se mantiene a la temperatura UHT en el tubo de mantenimiento (6) durante unos pocos segundos antes del enfriamiento *flash* (a vacío).

El enfriamiento flash tiene lugar en una cámara de expansión (7), equipada con un condensador, en la cual se mantiene un vacío parcial, mediante la bomba (8). El vacío se controla de forma que la cantidad de vapor que se disipa desde producto sea igual a la que previamente se inyectó. La bomba centrifuga (9) envía el producto tratado UHT hasta el homogeneizador aséptico (10) de doble etapa.

Después de homogeneizado, el producto se enfría a unos 20°C en un intercambiador de calor de placas (3), pasando a continuación directamente a la máquina de envasado aséptico o a un depósito aséptico para almacenamiento intermedio antes de efectuar la operación de llenado.

El agua de enfriamiento que se utiliza en el condensador se toma del tanque pulmón (1b), tras salir de la cámara de expansión (7), para ser utilizada como medio de precalentamiento tras calentarse en un inyector de vapor. En esta etapa de precalentamiento la temperatura del agua cae hasta unos 11°C. A continuación se puede utilizar como refrigerante del producto que viene desde el homogeneizador.

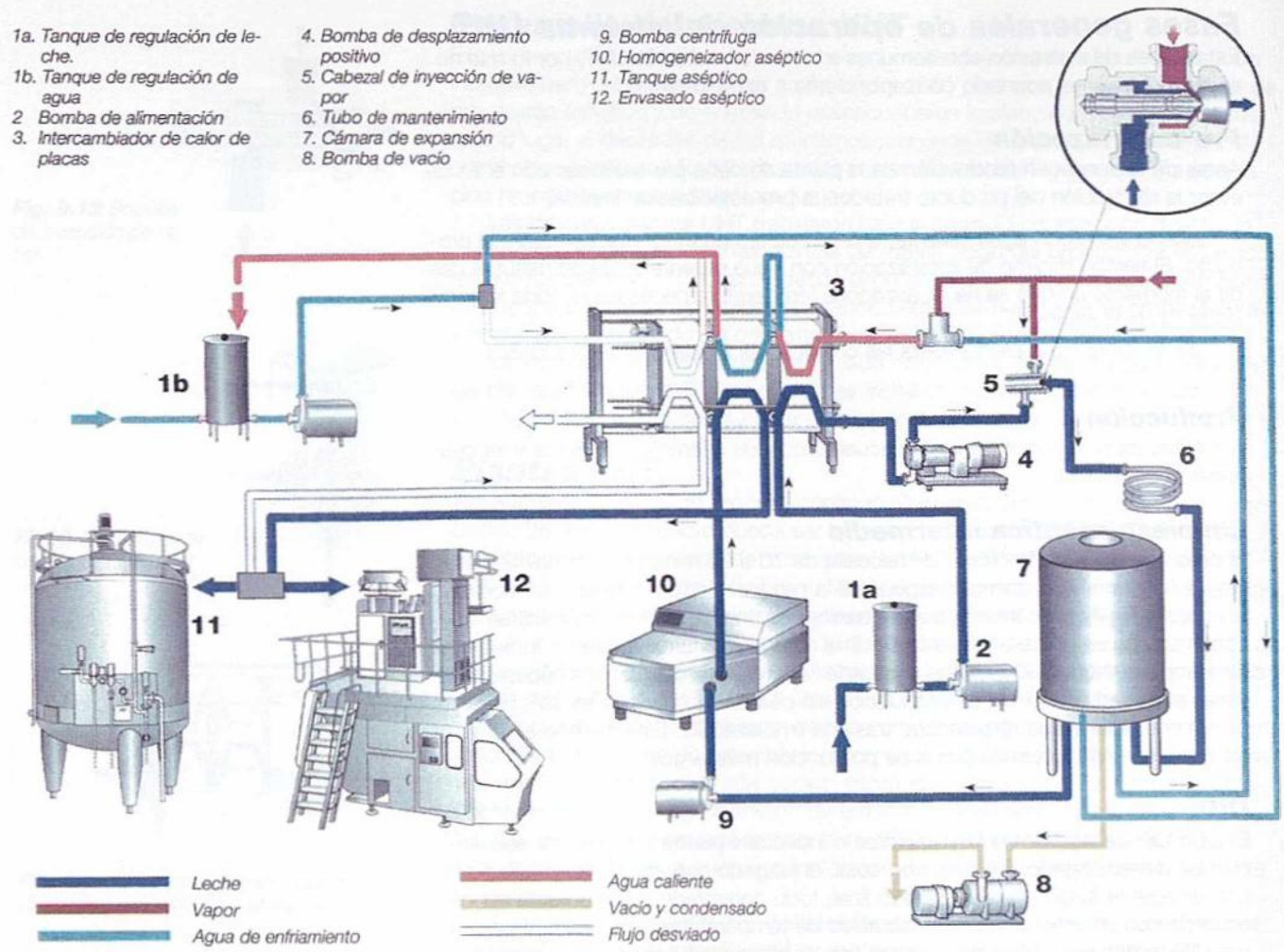


Fig. 9.17 *Proceso UHT con calentamiento mediante inyección directa de vapor combinada con intercambiador de calor de placas.*

En caso de que la temperatura descienda durante la producción el producto se deriva hasta un tanque de rechazo tras realizar un enfriamiento adicional. Simultáneamente la planta funciona con agua. Después del enjuagado con agua la planta se limpia (CIP) y se esteriliza antes de volver a comenzar.

Se dispone de plantas con capacidades de 2.000 - 30.000 l/h.

Planta UHT de tratamiento directo basada en la inyección de vapor y con intercambiador de calor tubular

Como alternativa al diseño anterior, el intercambiador de calor de placas (3, de la Figura 9.17) se puede cambiar por unos intercambiadores de calor tubulares cuando se vayan a tratar productos de baja o media viscosidad con o sin partículas o fibras.

Después de la pre-esterilización de la planta y el enfriamiento hasta unos 25ºC, la leche a unos 4ºC se envía a un intercambiador de calor tubular (3) para su pre-calentamiento hasta aproximadamente 95ºC (en las secciones 3a y 3c). Tras el mantenimiento (4a) para estabilizar las proteinas, la leche posteriormente se calienta indirectamente (3d).

La inyección de vapor (5) aumenta instantáneamente la temperatura hasta 140-150ºC. La leche se mantiene a esta temperatura durante unos pocos segundos (4b) antes de ser enfriada. El pre-enfriamiento se lleva a cabo en un intercambiador de calor tubular (3e) donde la energía térmica se utiliza para el calentamiento regenerativo. El vapor inyectado se evapora posteriormente como vapor en el envase a vacío (6), donde la temperatura de la leche cae hasta 80ºC.

El sistema de preenfriamiento antes de la evaporación flash mejora el rendimiento energético y minimiza las pérdidas de aroma de la leche.

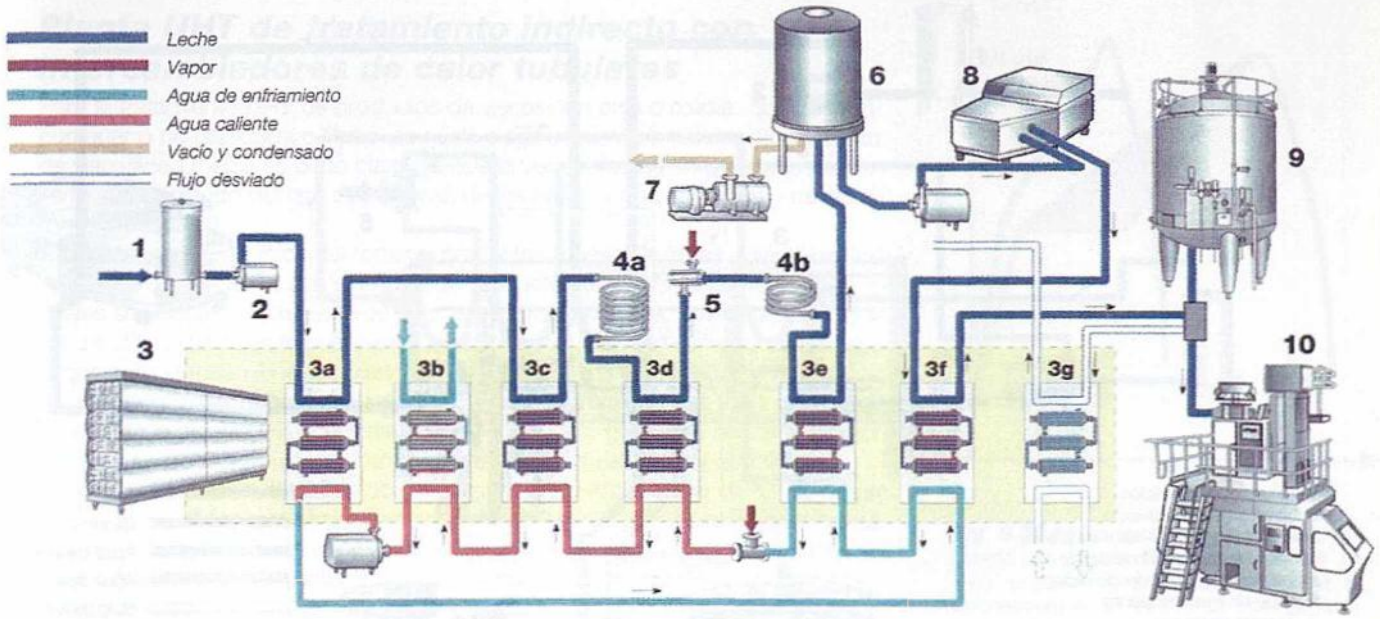


Fig. 9.18 *Sistema UHT directo e indirecto combinado.*

1 *Tanque de regulación*
2. *Bomba de alimentación*
3. *Intercambiador de calor tubular*
3a. *Sección de precalenamiento*
3b. *Enfriador de corrección*
3c. *Sección de calentamiento*
3d. *Sección de calentamiento final*
3e. *Sección de enfriamiento*
3f. *Sección de enfriamiento*
3g *Enfriador de flujo desviado*
4a *Tubo de mantenimiento estabilizante*
4b *Tubo de mantenimiento*
5 *Cabezal de inyección de vapor*
6 *Cámara de expansión*
7 *Bomba de vacío*
8 *Homogeneizador aséptico*
9 *Tanque aséptico*
10 *Envasado aséptico*

Tras la homogeneización aséptica (8), la leche se enfría de forma regenerativa (3f) hasta la temperatura de envasado, a aproximadamente 20ºC, y se envía hasta un tanque aséptico para almacenamiento intermedio antes de su envasado aséptico.

Los medios de calentamiento y enfriamiento circulan por un circuito cerrado de agua que transporta energía térmica entre las secciones del intercambiador de calor del proceso. El vapor se inyecta para añadir la pequeña cantidad de energía necesaria durante la producción normal.

Cuando se produce una caida de temperatura durante la producción, el producto se deriva hasta el tanque de rechazo y la planta funciona con agua. La planta se debe limpiar y esterilizar antes de volver a comenzar la producción.

Planta UHT de tratamiento directo con infusión de vapor

Este sistema difiere del sistema de inyección de vapor principalmente por la manera de poner en contacto la leche y el vapor.

El principio básico de la infusión de vapor consiste en calentar el producto pasándolo a través de una atmósfera de vapor, tal como se muestra en la Figura 9.19. El sistema de distribución del producto puede variar pero los tamaños resultantes de las gotas de leche deben ser uniformes ya que la velocidad de transferencia de calor no debe variar. Si los tamaños de gota varían el infusor tendrá un comportamiento que diferirá del establecido por el modelo teórico en el que se basó el diseño.

Si no es así el proceso será similar al sistema de inyección de vapor.

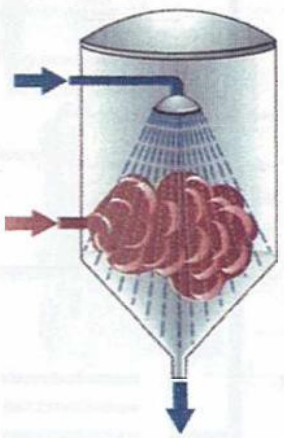


Fig. 9.19 *Envase en el que el producto se calienta por infusión en vapor.*

Planta UHT de tratamiento indirecto con intercambiadores de calor de placas

Las plantas UHT de tratamiento indirecto se construyen para capacidades de trabajo de hasta 30.000 l/h. En la Figura 9.20 se muestra un diagrama de flujo típico.

El producto a unos 4ºC se bombea desde el tanque de almacenamiento hasta el tanque pulmón (1) de la planta UHT y desde aquí, por medio de la bomba de alimentación (2), hasta la sección de regeneración del intercambiador de calor de placas (3). En esta sección el producto se calienta hasta unos 75ºC por medio de la leche UHT ya tratada, que se enfría al mismo tiempo. El producto precalentado es entonces homogeneizado (4) a la presión de 18-25 Mpa (180-250 bar). En las plantas UHT de tratamiento indirecto es posible la homogeneización antes del tratamiento UHT, lo que significa que se pueden utilizar homogeneizadores no asépti-

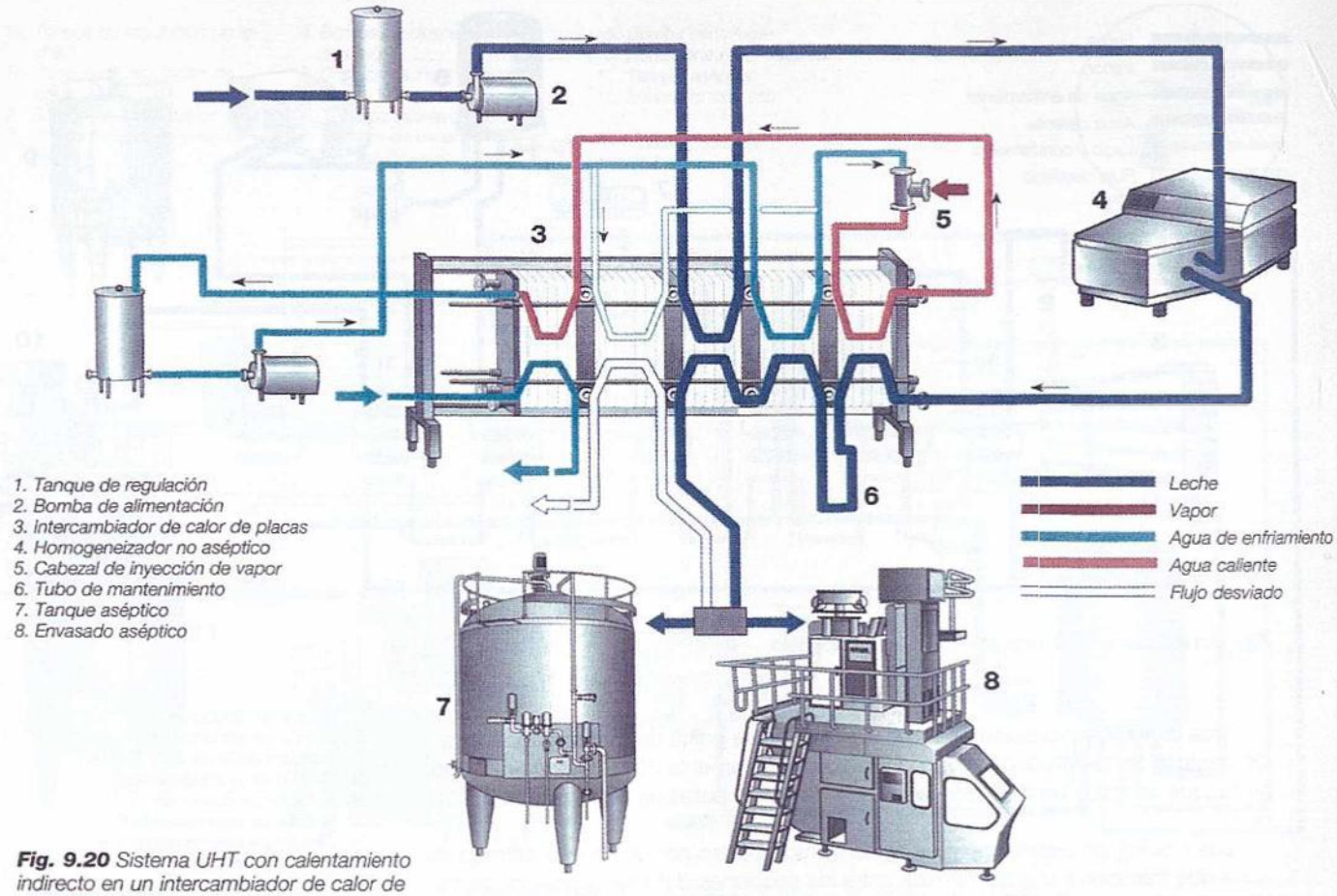


Fig. 9.20 *Sistema UHT con calentamiento indirecto en un intercambiador de calor de placas.*

cos. Sin embargo, se prefiere un homogeneizador aséptico para mejorar la textura y la estabilidad física de ciertos productos como la nata.

El producto precalentado y homogeneizado pasa ahora a la sección de calentamiento del intercambiador de calor de placas, donde su temperatura sube hasta unos 137°C. El medio de calentamiento es agua caliente en circuito cerrado, cuya temperatura se regula por inyección de vapor (5). Después del calentamiento, el producto pasa por el tubo de mantenimiento (6), dimensionado para un tiempo de residencia de unos 4 segundos.

Finalmente, el enfriamiento se realiza de forma regenerativa en dos etapas: primero frente al lado frío del circuito de agua caliente, y luego frente al producto frío entrante. El producto que sale del enfriamiento regenerativo continua hasta el envasado aséptico o hasta el depósito aséptico de almacenamiento intermedio.

Si la temperatura cae durante la producción, el producto se desvía hacia el tanque de rechazo y la planta funciona con agua. La planta debe limpiarse y esterilizarse antes de volver a trabajar.

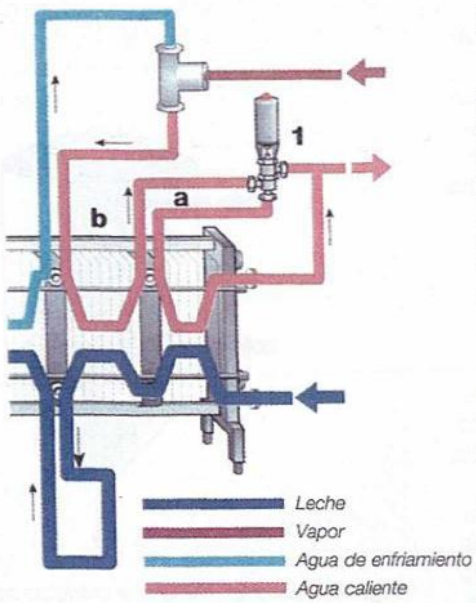


Fig. 9.21 *Sistema de calentamiento en dos etapas en un intercambiador de placas.*

Calentamiento en dos etapas (o calentamiento dividido)

En muchos casos las plantas UHT de tratamiento indirecto se diseñan para capacidades variables entre 50 y 100% del caudal nominal. Ello hace posible la conexión directa de dichas instalaciones a las máquinas de envasado aséptico. Para evitar el sobretratamiento del producto si para una de las máquinas de envasado aséptico, la sección de calentamiento se puede dividir en dos secciones.

El sistema de calentamiento dividido se ilustra en la Figura 9.21. Cuando tiene lugar una reducción repentina del 50%, con respecto al caudal nominal, se activa la válvula (1) y el medio de calentamiento no pasa por la primera sección de calentamiento (a). Entonces, la temperatura del producto se mantendrá a la temperatura de precalentamiento (75°C) hasta que el producto llegue a la segunda sección (b) de calentamiento (la de calentamiento final), donde tendrá lugar el calentamiento hasta la temperatura UHT requerida.

Las curvas tiempo/temperatura de la Figura 9.22 muestran la diferencia de necesidades térmicas en el producto trabajando con una capacidad nominal y a la mitad. La línea de trazos de la gráfica representa el desarrollo de la temperatura en un sistema sin calentamiento dividido, funcionando al 50% de su capacidad nominal.

Planta UHT de tratamiento indirecto con intercambiadores de calor tubulares

Para el tratamiento UHT de productos de viscosidad baja o media, que pueden contener o no partículas o fibras, se suele elegir un sistema tubular. El concepto de viscosidad media es poco claro, ya que la viscosidad de un producto puede variar dependiendo del tipo de material, de los aditivos que contenga y del tratamiento mecánico.

Las sopas, productos del tomate, productos a base de frutas o verduras, ciertos puddings y postres son ejemplos de productos de viscosidad media, para los cuales se aconseja el tratamiento en intercambiador tubular. Los sistemas tubulares se utilizan también frecuentemente cuando se necesitan tiempos de proceso largos para el tratamiento de ciertos productos lácteos de consumo.

El principio de tratamiento, tal como se muestra en la Figura 9.23, no difiere mucho de la planta UHT con intercambiador de calor de placas descrita enteriormente. Las plantas se construyen para capacidades de 1.000 a 30.000 l/h.

El intercambiador de calor tubular comprende cierto número de tubos ensamblados en módulos que se pueden conectar en serie y/o en paralelo para conseguir un sistema completo optimizado para llevar a cabo cualquier tratamiento de calentamiento o enfriamiento. El sistema también puede ir provisto con calentamiento dividido.

Si la temperatura cae durante la producción, el producto se desvía hacia el tanque de rechazo y la planta funciona con agua. La planta debe limpiarse y esterilizarse antes de volver a trabajar.

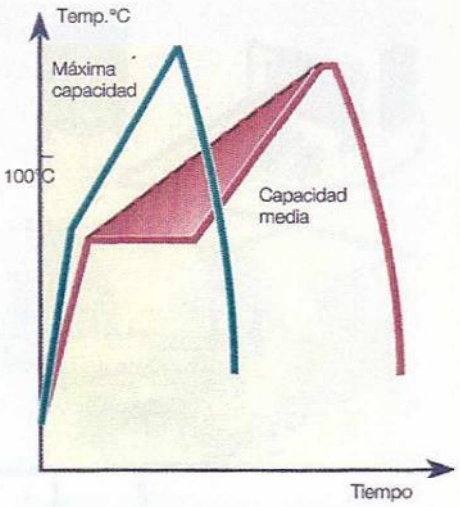
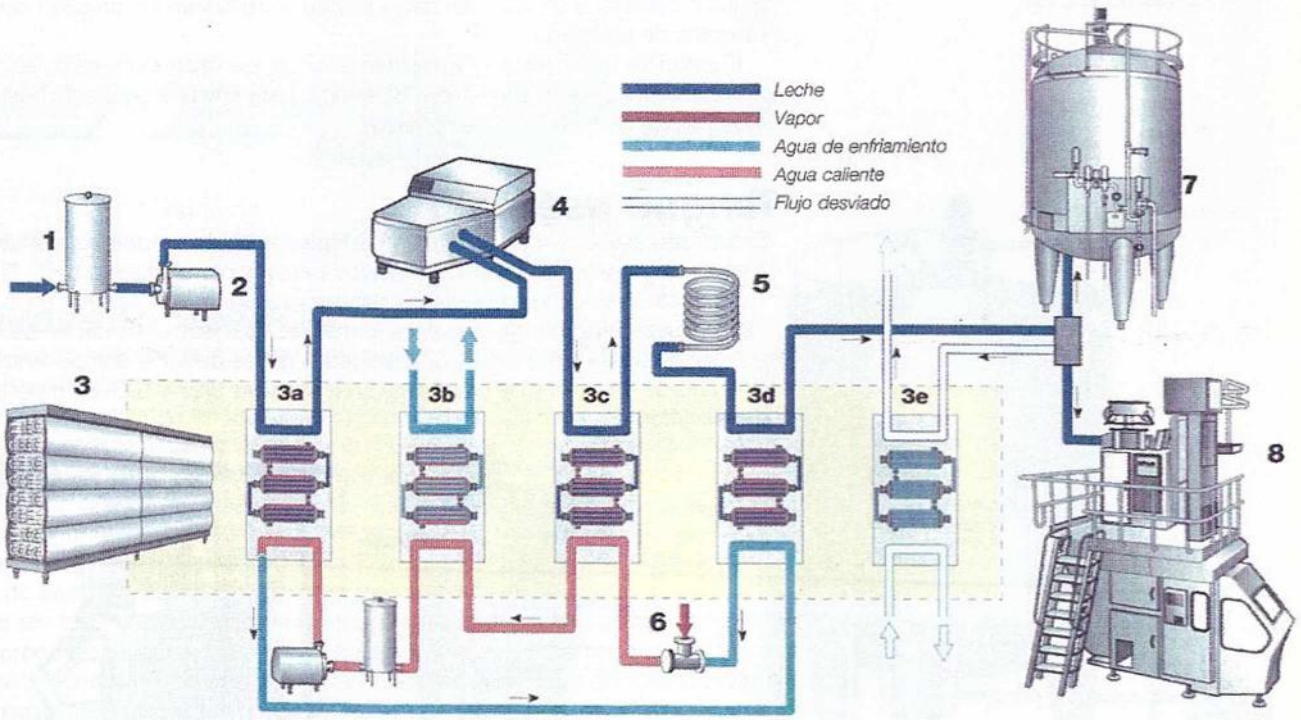


Fig. 9.22 *Efecto sobre la carga de calentamiento con un calentador en dos etapas. La línea de trazos representa la evolución de la temperatura en un sistema sin calentamiento dividido en dos etapas.*
Nota: en capacidades bajas el tiempo de mantenimiento se ha de doblar con el fin de compensar la temperatura UHT más baja.

Planta UHT de tratamiento indirecto con intercambiadores de calor de superficie rascada

Los intercambiadores de calor de superficie rascada son los más adecuados para el tratamiento de productos alimenticios de elevada viscosidad con o sin partículas en suspensión.

Los sistemas de este tipo constan de varios intercambiadores de calor de superficie rascada, tal como se ve en el diagrama esquemático del proceso que se muestra en la Figura 9.24. No se pueden establecer capacidades horarias específi-

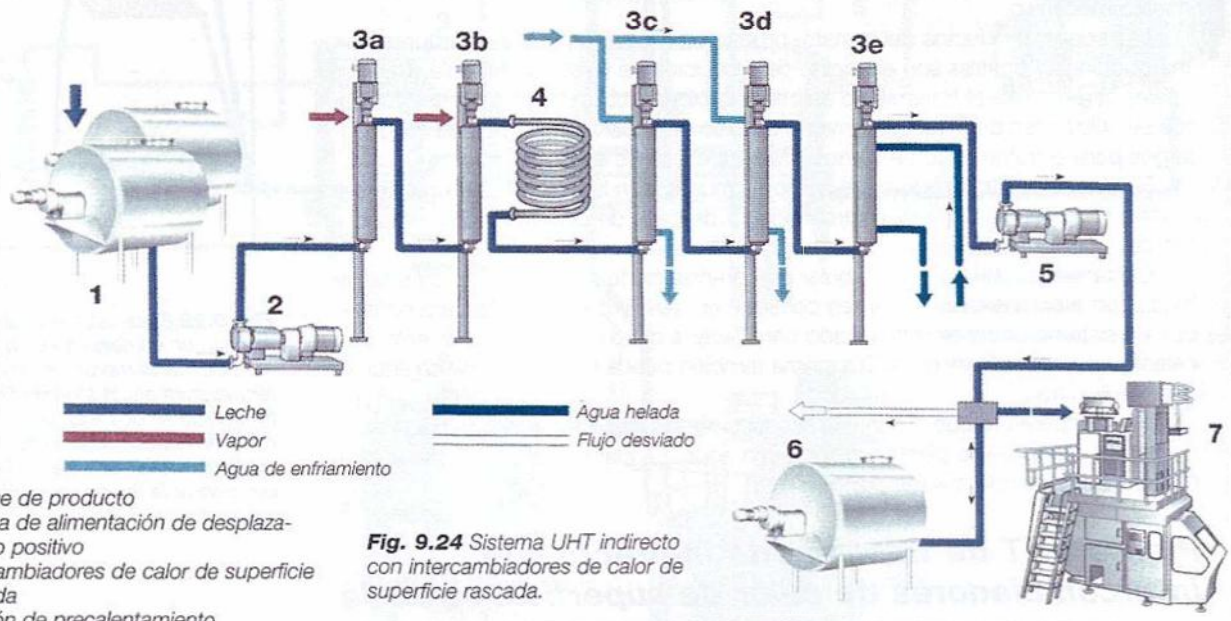


1. *Tanque de regulación*
2. *Bomba de alimentación*
3. *Intercambiador de calor tubular*
3a. *Sección de precalentamiento*
3b. *Sección de enfriamiento medio*
3d. *Sección de enfriamiento regenerativo*
3e. *Sección de enfriamiento de puesta en marcha*
4. *Homogeneizador no aséptico*
5. *Tubo de mantenimiento*
6. *Cabezal de inyección de vapor*
7. *Tanque aséptico*
8. *Envasado aséptico*

Fig. 9.23 *Sistema UHT indirecto con intercambiadores de calor tubulares.*

cas ni programas de temperaturas debido a la amplia variación de las características físicas de los productos individuales.

El producto se bombea desde un tanque (1) por medio de la bomba de alimentación (2) hasta el primer calentador de superficie rascada (3a). Se pueden utilizar etapas de calentamiento adicionales (3b) para llevar el producto hasta la temperatura deseada. Los monitores colocados en las diferentes etapas del proceso controlan que se consigan estas temperaturas.



1. *Tanque de producto*
2. *Bomba de alimentación de desplazamiento positivo*
3. *Intercambiadores de calor de superficie rascada*

3a. Sección de precalentamiento
3b. Sección de calentamiento final
3c. Sección de enfriamiento
3d. Sección de enfriamiento
3e. Sección de enfriamiento

4. *Tubo de mantenimiento*
5. *Bomba de desplazamiento positivo*
6. *Tanque aséptico*
7. *Envasado aséptico*

Fig. 9.24 *Sistema UHT indirecto con intercambiadores de calor de superficie rascada.*

El tubo de mantenimiento (4) mantiene el producto a la temperatura requerida durante un periodo de tiempo predeterminado. El producto se enfría con agua (3c y 3d) y agua helada (3e) hasta alcanzar la temperatura de envasado.

Finalmente, el producto enfriado se bombea hasta un tanque pulmón aséptico (6) que proporciona un volumen de seguridad entre la linea de proceso continuo y el sistema de envasado.

Cuando se tienen fallos que impidan alcanzar los valores pre-establecidos, automáticamente se abre una válvula de retorno para enviar el producto hasta un tanque de almacenamiento de rechazo.

Tanque aséptico

El depósito aséptico, que aparece en la Figura 9.25, se emplea para el almacenamiento intermedio de productos lácteos tratados por el sistema UHT. El flujo de producto y las conexiones de los sistemas auxiliares se muestran en la Figura 9.26. Puede utilizarse de diferentes formas en las líneas UHT, dependiendo del diseño de la planta y de las capacidades de los distintos componentes de las lineas de proceso y de envasado. En las Figuras 9.27 y 9.28 se muestran dos ejemplos.

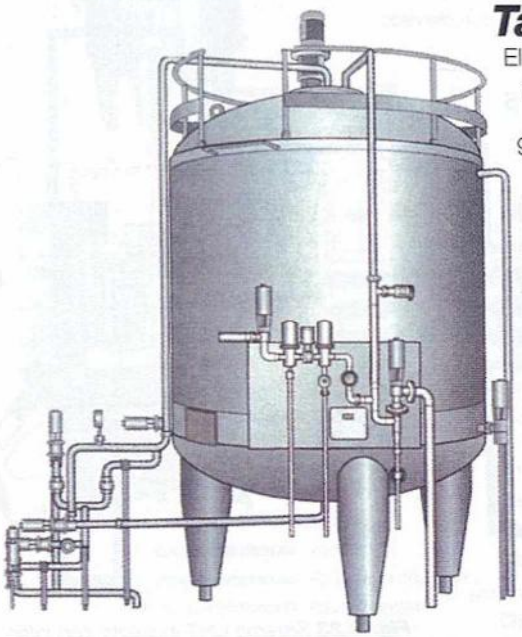


Fig. 9.25 *Tanque aséptico con accesorios.*

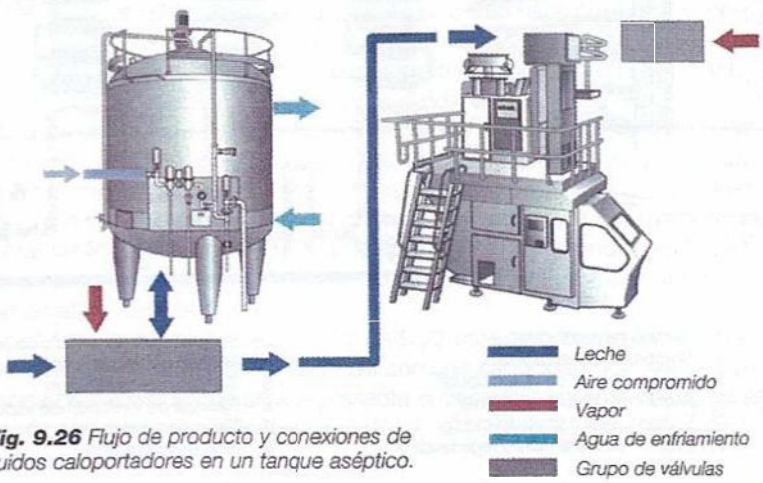


Fig. 9.26 *Flujo de producto y conexiones de fluidos caloportadores en un tanque aséptico.*

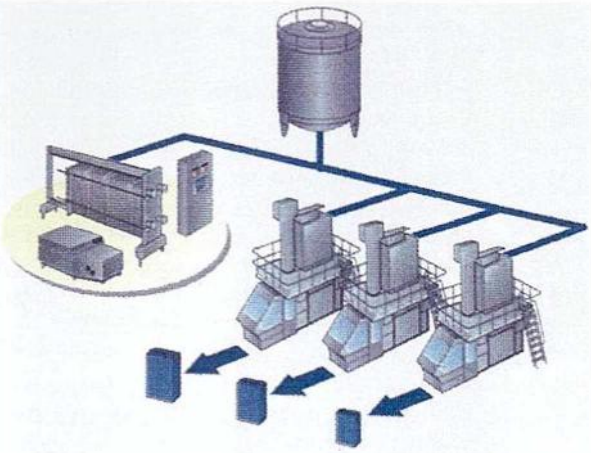


Fig. 9.27 *Tanque aséptico usado como pulmón para el envasado de un sólo producto.*

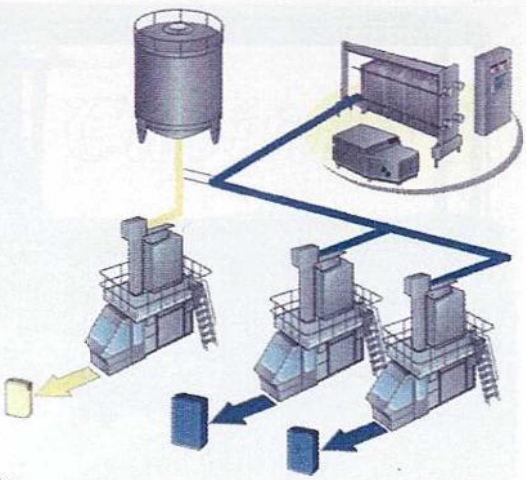


Fig. 9.28 *Tanque aséptico usado como tanque de almacenamiento intermedio para uno de los productos al mismo tiempo que otro producto se procesa y envasa.*

- Si una de las máquinas de envasado se para accidentalmente, el tanque aséptico se hace cargo del producto sobrante durante esa parada.
- Envasado simultáneo de dos productos. El tanque aséptico se llena primero con un producto, que cubriría totalmente el ciclo de envasado para ese producto. A continuación la planta se dedicará a trabajar con otro producto que se envasa directamente en las líneas de envasado.

Se puede flexibilizar el plan de producción, si uno o más depósitos asépticos son incluidos en la linea de proceso.

El envasado directo desde una planta de tratamiento UHT necesita la recirculación de un volumen extra mínimo de 300 litros por hora para mantener una presión constante en las máquinas de llenado. Los productos que son sensibles al sobretratamiento no tolerarían esto, por lo que la sobrecapacidad requerida se debe de tomar de un tanque aséptico.

La disposición óptima se debe decidir para cada proceso individual según la planta UHT, los tanques asépticos y las máquinas de envasado aséptico.

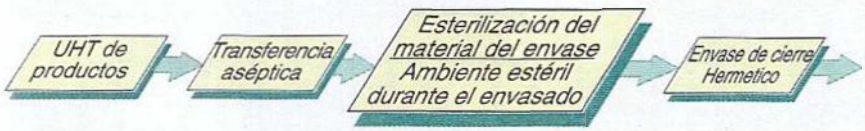


Fig. 9.29 *Envasado en condiciones asépticas.*

Envasado aséptico

El envasado aséptico se ha definido como un procedimiento que consiste en la esterilización del material de envasado o envase, en el llenado con un producto comercialmente estéril en un ambiente estéril, y en la producción de envases que permitan ser adecuadamente cerrados para prevenir la recontaminación, por ejemplo que sean herméticamente sellados (Figura 9.29).

Para productos no refrigerados con una larga vida útil el envase debe también proporcionar una completa protección frente a la luz y el oxígeno atmosférico. Un envase de leche de larga duración debe ir provisto entonces de una fina capa de hoja de aluminio, encerrado entre películas de polietileno.

El término "aséptico" implica la ausencia o exclusión de organismos indeseados procedentes del producto, envase u otras áreas específicas, mientras que el término "hermético" se utiliza para indicar unas propiedades mecánicas adecuadas que excluyan la entrada de bacterias en el envase o, más estrictamente, para prevenir el paso de microorganismos y gas o vapor en o desde el envase.

Plantas piloto de tratamiento UHT

Existen plantas piloto especiales para probar productos nuevos o interesantes. En estas plantas es posible estudiar los efectos producidos por la variación de pará-

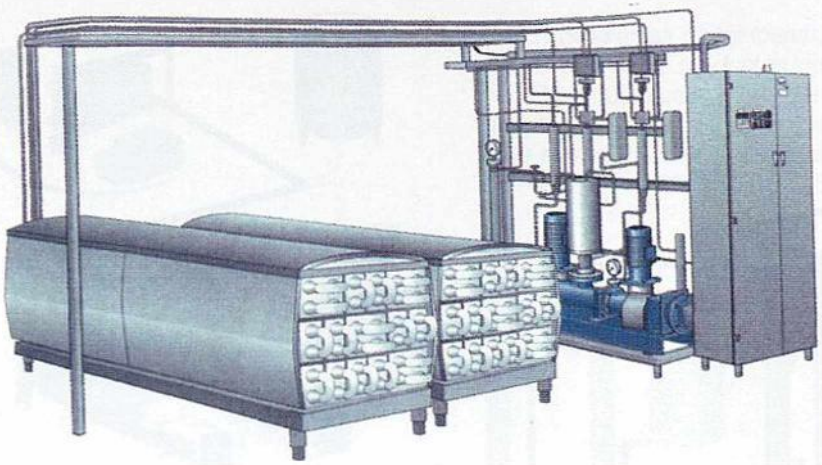


Fig. 9.30 *Planta piloto UHT con intercambiadores de calor tubulares.*

metros tecnológicos relacionados con los procesos UHT, tales como programas de temperatura, tiempos de mantenimiento, métodos de calentamiento (directo o indirecto), desaireación o no del producto, así como temperaturas y presiones de homogeneización. Muchos de los parámetros tecnológicos tienen que ver con el producto, como por ejemplo las fórmulas, los ingredientes, el tratamiento previo, etc.

Estos parámetros de producto son tan importantes como los parámetros de proceso. El desarrollo exitoso de un nuevo producto UHT precisa que todos estos parámetros se estudien juntos. Al mismo tiempo, se puede utilizar la planta piloto para estudiar las propiedades del producto con relación al tratamiento térmico, como estabilidad, sensibilidad y resistencia térmica de las esporas.

Muchos laboratorios en la industria alimentaria en general y láctea en particular han instalado plantas piloto UHT. Instalaciones de este tipo existen en escuelas, universidades y otras instituciones científicas interesadas en la tecnología alimentaria y láctea. Algunos de los fabricantes de plantas UHT también disponen de plantas piloto UHT para pruebas e investigaciones con los productos de sus clientes.

La planta UHT completa puede constar de un módulo para calentamiento indirecto en intercambiadores de calor de placas y módulos adicionales para calentamiento directo, calentamiento tubular y homogeneización. El diagrama esquemático de la Figura 9.31 ilustra una planta piloto de calentamiento indirecto en intercambiadores de calor de placas, o también para calentamiento en un intercambiador de calor tubular, y módulos adicionales para calentamiento directo y homogeneización del producto, sea anterior (no aséptico, 5a) o posterior (aséptico, 5b) al tratamiento UHT.

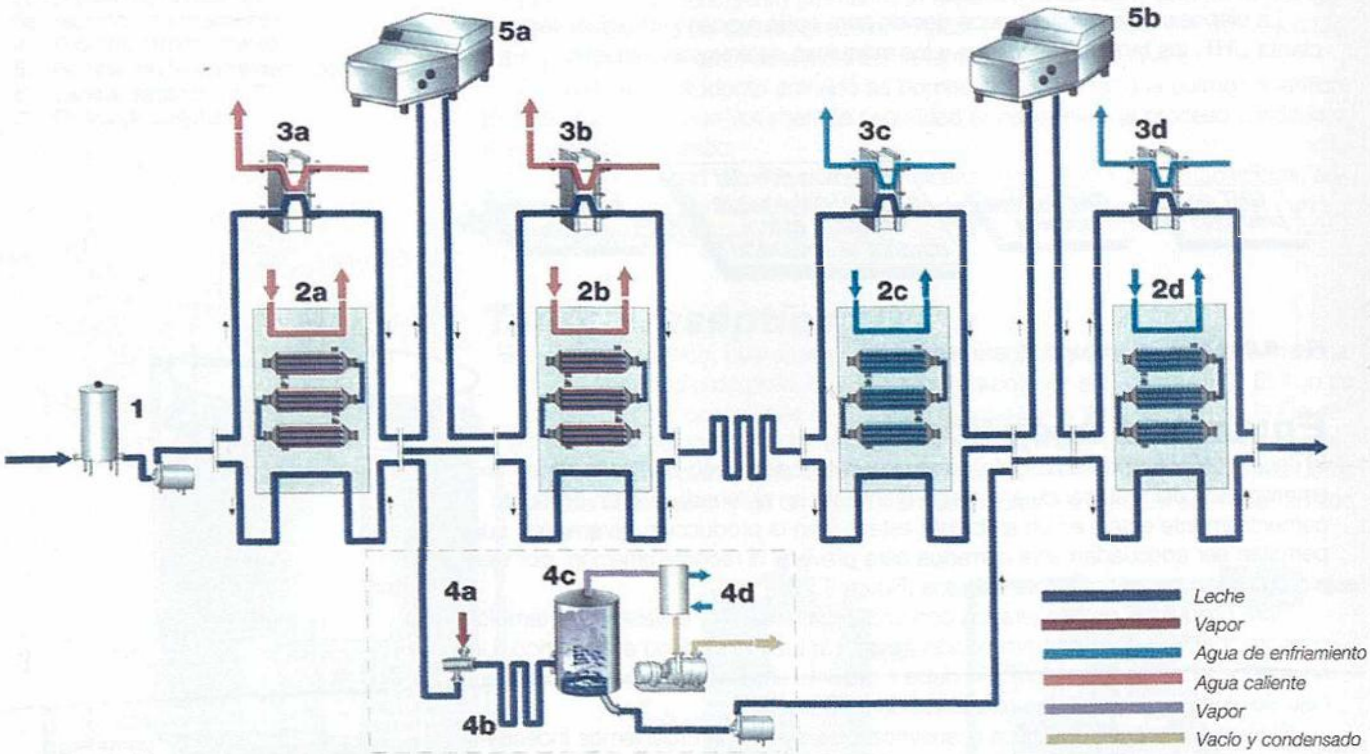


Fig. 9.31 *Diagrama de flujo del proceso de una planta piloto UHT, que incluye calentamiento indirecto en intercambiadores de calor tubulares y un módulo de calentamiento directo (comprendido dentro de la línea de trazos) así como las alternativas de homogeneización aséptica y no aséptica.*

1. *Tanque de regulación*
2a. *Precalentador tubular*
2b. *Calentador tubular*
2c. *Enfriador tubular*
2d. *Enfriador tubular*
3a. *Precalentador de placas*
3b. *Calentador de placas*
3c. *Enfriador de placas*
3d. *Enfriador de placas*
4a. *Inyección directa de vapor*
4b. *Tubo de mantenimiento*
4c. *Cámara de vacío*
4d. *Condensador*
5a. *Homogeneizador no aséptico*
5b. *Homogeneizador aséptico*

Capítulo 10

Preparación de cultivos y starters

Los cultivos bacterianos, conocidos también como fermentos o starters, se utilizan en la elaboración de yogur, kefir y otros productos lácteos acidificados o fermentados, asi como en la fabricación de mantequilla y queso. Los fermentos se añaden al producto y se les deja crecer en él bajo condiciones controladas. En el transcurso de la correspondiente fermentación, las bacterias producen sustancias que dan al producto fermentado sus propiedades características tales como acidez (pH), sabor, aroma y consistencia. La caida del pH, que se produce cuando las bacterias fermentan la lactosa y dan lugar a la producción de ácido láctico, tiene un efecto conservador sobre el producto, al mismo tiempo que mejoran su valor nutritivo y su digestibilidad.

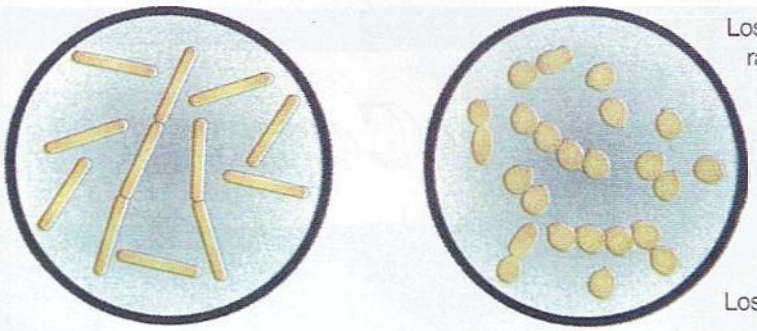


Fig. 10.1 *Bacterias en yogur: Lactobacillus bulgaricus, izquierda, y Streptococcus thermophilus.*

Los diferentes productos lácteos acidificados tienen características distintas, y utilizan fermentos también distintos para su fabricación. Los cultivos se pueden clasificar de acuerdo con sus temperaturas óptimas de crecimiento:

- Bacterias mesófilas -con unas temperaturas óptimas de crecimiento de 20 a 30ºC
- Bacterias termófilas -con unas temperaturas óptimas de crecimiento de 40 a 45ºC

Los cultivos pueden ser del tipo:

- Simple cepa (conteniendo una única cepa de bacterias);
- Múltiple cepa (mezcla de varias cepas, cada una de ellas con sus propios efectos específicos):

Los cultivos de bacterias mesófilas se pueden dividir además en cultivos O, L, D y LD. La Tabla 10.1, reproducida del *Bulletin of the IDF* (263/1991), da un listado de los nombres nuevos y antiguos de distintos cultivos. En este capítulo se utilizarán los nombres antiguos.

Algunas bacterias *Str. diacetylactis* son tan potentes como acidificadoras que se pueden utilizar sólo como cultivos acidificadores, pero son utilizados principalmente junto con *Str. cremoris/lactis*. Sin embargo no es posible utilizar un cultivo Leuc. citrovorum, ya que el crecimiento de *Leuc. citrovorum* en la leche viene condicionado por la disponibilidad de nutrientes producidos por *Str. lactis* o *Str. cremoris*. El *Leuc. citrovorum* crece lentamente en la leche en ausencia de bacterias productoras de ácido, y no puede producir sustancias aromáticas en tales condiciones.

Tabla 10.1

Nombres nuevos y viejos de distintos fermentos y sus usos.

Tipo	Nombre viejo	Nombre nuevo	Producto
O	*Streptococcus cremoris*	*Lactococcus lactis ssp. cremoris*	Queso Cheddar
	Streptococcus lactis	*Lactococcus lactis ssp. lactis*	Queso Feta
			Queso Cottage
			Quarg
L*	*Streptococcus cremoris*	*Lactococcus lactis ssp. cremoris*	Queso Continental (con ojos)
	Streptococcus lactis	*Lactococcus lactis ssp. lactis*	
	Leuconostoc citrovorum	*Leuconostoc mesenteroides ssp. cremoris*	Mantequilla láctica
	Leuconostoc lactis	*Leuconostoc lactis*	Queso Feta
D**	*Streptococcus cremoris*	*Lactococcus lactis ssp. cremoris*	Mantequilla láctica
	Streptococcus lactis	*Lactococcus lactis ssp. lactis*	
	Streptococcus diacetylactis	*Cit⁺Lactococci****	
LD	*Streptococcus cremoris*	*Lactococcus lactis ssp. cremoris*	Queso continental (con ojos)
	Streptococcus lactis	Lactococcus lactis ssp. lactis	Queso madurado con mohos
	Streptococcus diacetylactis	*Cit⁺Lactococci****	Mantequilla acidificada
	Leuconostoc citrovorum	*Leuconostoc mesenteroides ssp. cremoris*	Mantequilla láctica
	Leuconostoc lactis	*Leuconostoc lactis*	
Termófilo			
	Streptococcus thermophilus	*Streptococcus salivaius ssp. thermophilus*	Yogur
	Lactobacillus bulgaricus	*Lactobacillus delbrueickii ssp. bulgaricus*	Queso Mozzarella
	Streptococcus thermophilus	*Streptococcus salivarus ssp. thermophilus*	Queso Emmental
	Lactobacillus helvéticus	*Lactobacillus helvéticus*	Queso Grana
	Lactobacillus lactis	*Lactobacillus delbrueckii ssp. lactis*	

*L = Leuconostoc **D = diacetylactis

***Cit⁺ = Abreviación de citrato que es metabolizado para formar compuestos aromáticos y gustativos

Las características bacterianas, como temperatura óptima de crecimiento y tolerancia a la sal son muy importantes en la composición de un cultivo. El objetivo de utilizar mezclas de cepas es producir el resultado deseado en simbiosis, sin que tenga lugar competencia de unas con otras. En este sentido, sus características han de ser complementarias. La Tabla 10.2 lista los datos esenciales de algunos cultivos bacterianos importantes.

Tabla 10.2
Características de algunas bacterias de cultivo importantes

	Bacteria (nombre antiguo)	Crecimiento ótimo temp. °C	Tolerancia máxima a la sal para crecimiento, %	Formación de ácido ferment. (%)	Ácido cítrico ferment.
I	Streptococci				
	Str. lactis	about 30	4 - 6.5	0.8 - 1.0	–
	Str. cremoris	25 - 30	4	0.8 - 1.0	–
	Str. diacetylactis	about 30	4 - 6.5	0.8 - 1.0	+
	Str. thermophilus	40 - 45	2	0.8 - 1.0	–
	Leuc. citrovorum	20 - 25	–	poca	+
II	Lactobacilli				
	Lb. helvéticus	40 - 45	2	2.5 - 3.0	–
	Lb. lactis	40 - 45	2	1.5 - 2.0	–
	Lb. bulgaricus	40 - 50	2	1.5 - 2.0	–
	Lb. acidophilus	35 - 40	–	1.5 - 2.0	–

Las industrias lácteas compran fermentos ya mezclados y preparados (cultivos comerciales) procedentes de laboratorios especializados. Estos laboratorios ponen mucho esfuerzo en investigación y desarrollo para conseguir los cultivos especiales más adecuados para obtener cada producto, por ejemplo mantequilla, queso y un gran número de productos lácteos acidificados. De esta manera, las industrias lácteas pueden obtener cultivos con propiedades seleccionadas para conseguir las caracteristicas especificas de producto, tales como textura, sabor y viscosidad.

Las industrias lácteas pueden comprar los cultivos comerciales según distintas presentaciones:

- líquidos, para la propagación a partir de un cultivo madre (actualmente esta forma es rara);
- liofilizados, como un concentrado de cultivos en forma de polvo, para la propagación como cultivo industrial;
- congelados, como un concentrado de cultivos para la propagación como cultivo industrial;
- congelados, como cultivos superconcentrados en forma muy soluble, para inoculación directa del producto.

Etapas de propagación

Durante los últimos años se han utilizado generalmente cultivos concentrados para la producción directa de los fermentos industriales, como se ve en la Figura 10.2, y para su utilización directa en la producción. El manejo futuro de cultivos probablemente se basará en cultivos concentrados, especialmente diseñados, que podrán utilizarse directamente en producción sin necesidad de propagación posterior en la industria láctea.

Existen, sin embargo, todavía muchas industrias lácteas que preparan sus propios fermentos industriales, en sucesivas etapas, a partir de un cultivo madre, como se ve en la Figura 10.3; que es la técnica que se describirá aquí.

El proceso puede constar de dos o más etapas. Las diversas etapas en la propagación de los cultivos se conocen con los siguientes nombres:

- **Cultivo comercial**, que es el cultivo maestro *(master)* que la industria láctea compra al laboratorio.
- **Cultivo madre**, que es el cultivo preparado por la industria láctea a partir del cultivo master. El cultivo madre se prepara de forma diaria y, como su nombre indica, es el origen de todos los demás cultivos hechos en esa industria láctea.

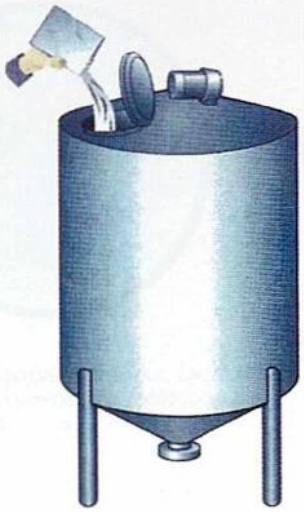


Fig. 10.2 *Fermento industrial elaborado a partir de cultivos comerciales congelados o liofilizados.*

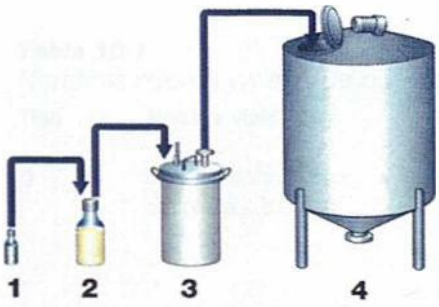


Fig. 10.3 *Pasos en la elaboración de fermentos.*
1. Cultivo comercial
2. Cultivo madre
3. Cultivo intermedio
4. Cultivo industrial

- **Cultivo intermedio**, que es una etapa previa a la producción de grandes volúmenes de cultivo industrial.
- **Cultivo industrial**, que es el utilizado en el proceso de producción.

Tecnología del proceso

La producción de cultivo *(starter)* es uno de los procesos más importantes y también difíciles que se realizan en una industria láctea. Paradas imprevistas en su producción pueden originar pérdidas financieras muy fuertes, ya que las modernas industrias lácteas procesan grandes cantidades de leche.

Se debe prestar una atención muy especial a la tecnología de elaboración y a la elección correcta de los equipos de proceso. La producción de fermentos exige los más altos niveles de higiene. El riesgo de infección por levaduras presentes en el aire, por mohos y por bacteriófagos debe ser reducido al mínimo absoluto. Los cultivos madre deben prepararse en una sala separada, con suministro de aire filtrado y manteniéndose en la sala una presión ligeramente superior a la presión atmosférica normal. Los sistemas de limpieza de los equipos deben ser también cuidadosamente diseñados para evitar que residuos de detergentes o esterilizantes entren en contacto con los cultivos y los estropeen.

La producción de cultivos intermedios e industriales puede efectuarse cerca del punto de producción o en la misma sala utilizada para la preparación de los cultivos madre. Cada transferencia del cultivo a la etapa siguiente de producción debe tener lugar preferiblemente bajo condiciones asépticas.

Las etapas del proceso

El proceso, que se presenta en la Figura 10.4, es esencialmente el que se utiliza tanto para la preparación del cultivo madre, como de los cultivos intermedios e industriales, e incluye las siguientes etapas:

- tratamiento térmico del sustrato;
- enfriamiento hasta la temperatura de inoculación.
- inoculación;
- incubación;
- enfriamiento del cultivo terminado,
- almacenamiento del cultivo.

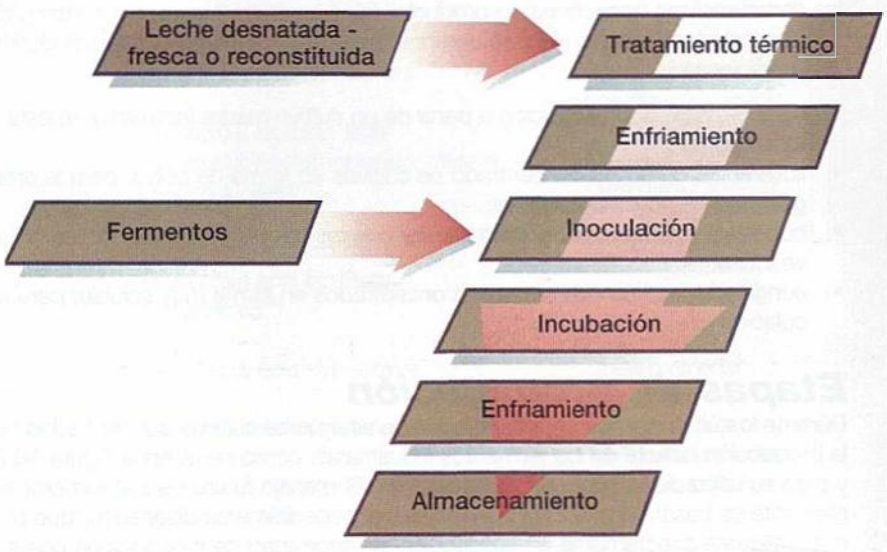


Fig. 10.4 *Diagrama de bloques de la elaboración de fermentos.*

La leche desnatada es el sustrato o medio de cultivo utilizado con más frecuencia para la producción de fermentos, aunque otra alternativa es la leche desnatada reconstituida con un 9-12% de materia seca (MS), hecha a partir de leche desnatada en polvo de gran calidad.

La razón básica que justifica la utilización de leche desnatada fresca o reconstituida es que de esta manera se presentan muchos menos problemas de aroma y sabor en el cultivo. La leche fresca de granjas seleccionadas también se utiliza en algunas industrias lácteas.

Un medio con una composición constante, como leche desnatada reconstituida libre de antibióticos, es más aconsejable que una leche desnatada normal.

El sustrato se puede modificar por adición de factores de crecimiento tales como Mn^{2+} (Manganeso), ejemplo: 0.2 mg $MnSO_4$ por litro de cultivo, que se añade para promover el crecimiento de Leuc. citrovorum. Los medios inhibidores de fagos (MIF) suponen una alternativa para la producción de fermentos de simple-cepa o multi-cepa. Estos sustratos contienen fosfatos, citratos u otros agentes quelantes que insolubilizan el Ca^{2+} (Calcio). La razón de provocar esta insolubilización es que la mayoría de los fagos necesitan el Ca^{2+} para su proliferación. Eliminando el Ca^{2+} del sustrato se protege a las bacterias del ácido láctico de que se infecten con lo que se evita el fallo de actividad del fermento. Los polvos de leche desnatada con MIF están disponibles en el mercado.

Tratamiento térmico del sustrato

La primera etapa en la producción de fermentos es el tratamiento térmico del sustrato. Se calienta a 90-95°C y se mantiene a esa temperatura durante 30-45 minutos. Este tratamiento térmico del sustrato mejora sus propiedades, ya que se produce una:

- destruccion de los bacteriófagos
- eliminación de sustancias inhibidoras
- cierta descomposición de las proteinas
- expulsión del oxígeno disuelto, y
- destrucción de los microorganismos existentes.

Enfriamiento hasta la temperatura de inoculacion

Después de efectuado el tratamiento térmico, el sustrato se enfría hasta la temperatura de inoculación, que depende del tipo de cultivo bacteriano utilizado. Es importante que se respeten las temperaturas recomendadas por el fabricante de cultivos comerciales, o las temperaturas óptimas que se hayan obtenido empíricamente.

En la propagación de fermentos multi-cepa, incluso pequeñas desviaciones de la temperatura adecuada de incubación puede favorecer el crecimiento de una de las cepas a expensas de la(s) otra(s), con lo que no se obtendrían las características típicas deseadas en el producto final. La Figura 10.6 demuestra lo que sucede cuando se incuba una bacteria típica del yogur en un rango progresivo de temperaturas.

Las temperaturas normales de inoculación oscilan entre 20 y 30°C para las bacterias de tipo mesófilo, y entre 42 y 45°C para los tipos termófilos.

Inoculación (siembra)

En la inoculación, se transfiere una determinada cantidad de cultivo bacteriano al sustrato tratado térmicamente, una vez que la temperatura se ha ajustado al nivel correcto. Para evitar desviaciones en el cultivo es muy importante que la dosis de fermento, la temperatura de propagación y el tiempo sean mantenidos constantes a través de todas las etapas (cultivo madre, cultivo intermedio y cultivo industrial).

Las cantidades de fermento o starter pueden también afectar a las proporciones relativas de las distintas bacterias que producen ácido láctico y sustancias aromáticas. Por ello, las variaciones en la cantidad de fermentos pueden producir variaciones en el producto final. Además, cada fabricante debe determinar las condiciones prácticas que mejor se acoplan a su proceso de producción. La Figura 10.5 muestra cómo la cantidad de fermentos utilizada en la inoculación afecta al proceso de acidificación en un cultivo. Las curvas representan dosis del 0.5% y del 2.5%, respectivamente. La temperatura de inoculación en ambos casos es de 21°C.

Incubación

Tan pronto como se ha realizado la inoculación y los fermentos se han mezclado con el sustrato, las bacterias comienzan a multiplicarse, es decir, empieza la incubación. El período que dura esta etapa viene determinado por los tipos de bacterias utilizados, las dosis de inoculación, etc., y puede variar entre 3 y 20 horas. Es muy importante controlar cuidadosamente la temperatura y evitar que productos contaminantes entren en contacto con el cultivo.

Durante la incubación, las bacterias se multiplican rápidamente, fermentando la lactosa con producción de ácido láctico. Un cultivo que contenga bacterias productoras de aroma también originará sustancias tales como diacetilo, ácidos acético y propiónico, cetonas y aldehidos de varias clases, alcoholes, ésteres y ácidos grasos, así como anhidrido carbónico.

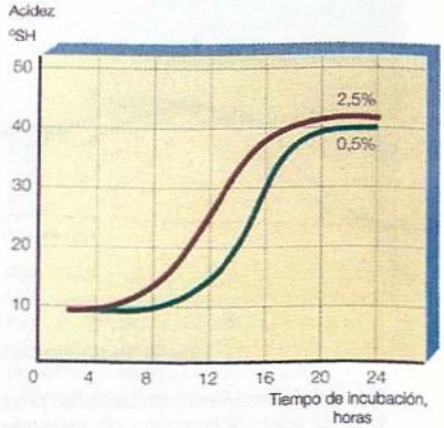


Fig. 10.5 *Curvas de desarrollo de ácido para inoculación con 0.5% y 2.5% de un cultivo mesófilo. Temperatura de incubación: 21°C.*

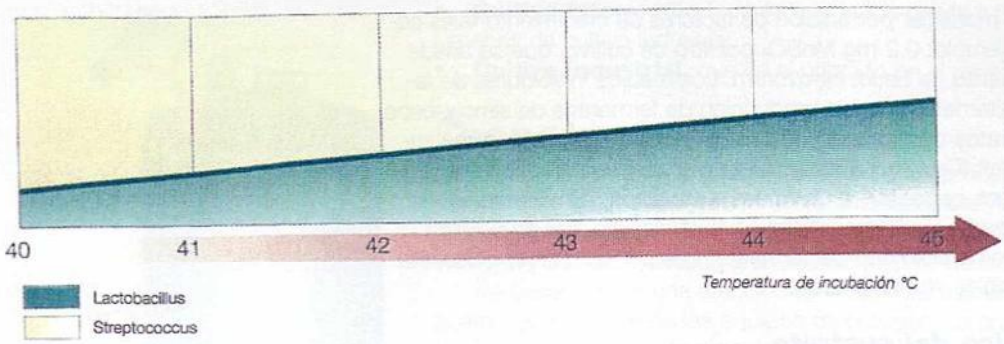


Fig. 10.6 *Efecto de la temperatura de incubación sobre el recuento relativo de cocos y bacilos con dosis constantes y tiempo de incubación constante.*

La importancia de mantener una temperatura correcta de incubación aparece en el gráfico de la Figura 10.6, referida a los cultivos para yogur. Estos cultivos contienen dos cepas de bacterias, *Str. termophilus* y *Lb. bulgaricus*, que coexisten en simbiosis y juntas producen las características deseadas del yogur, tales como pH, sabor, aroma y consistencia. La mayoría de los yogur tienen un ratio de cocos a bacilos entre 1:1 y 2:1. Nunca se ha de permitir que los bacilos superen esta proporción ya que el sabor sería entonces demasiado ácido.

En la Figura 10.7 se muestra un ejemplo de crecimiento de *Str. thermophilus* y *Lb. bulgaricus* que da lugar a la formación de aroma.

En este contexto se ha de mencionar que el acetaldehido aparece (Pette y Lolkema, 1950; Schultz y Hingst, 1954) como el principal componente aromático del yogur. El papel principal en la producción de acetaldehido es atribuido al *Lb. bulgaricus*, aunque distintas cepas de estas especies muestran considerables diferencias. En el crecimiento asociado de *Str. termophilus* y *Lb. bulgaricus*, la velocidad de producción de acetaldehido se incrementa notablemente si se compara con la producción unicamente de las especies de *Lb. bulgaricus* (Bottazzi et al., 1973). De aquí que la relación simbiótica entre estas especies influya favorablemente sobre la producción de acetaldehido en la elaboración de yogur. Durante la producción de yogur, la formación de acetaldehido no es evidente hasta que no se consigue cierto nivel de acidificación (pH 5.0). Se consigue un máximo a pH 4.2 y se estabiliza a pH 4.0 (A.Y. Tamime and R.K. Robinson, Yoghurt -science and technology). El aroma y el sabor óptimo del yogur se obtiene usualmente con un contenido de acetaldehido que oscila entre 23 y 41 ppm y un valor de pH de entre 4.40 y 4.00.

Uno de los factores que afectan al ratio cocos/bacilos es la temperatura de incubación. A 40°C la proporción es de 4:1, mientras que a 45°C es de 1:2 (véase la Figura 10.6). La temperatura óptima de inoculación (y también de incubación) en la elaboración de yogur es, por tanto, de 43°C para conseguir un ratio cocos/bacilos de 1:1, con una dosis de inoculación del 2.5-3% y un tiempo de incubación de 2.5-3 horas.

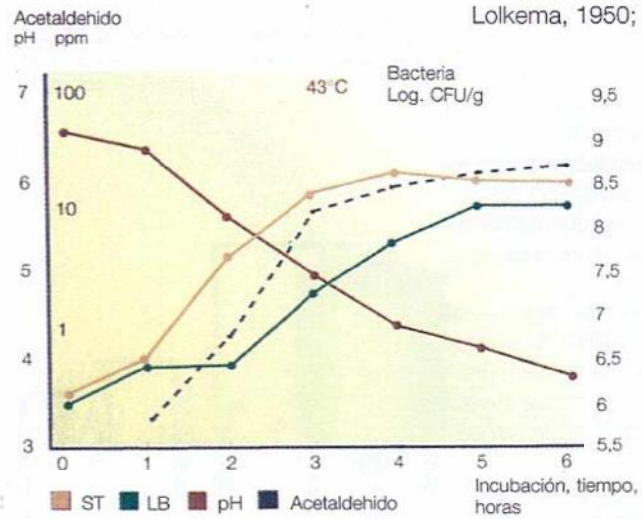


Fig. 10.7 *Crecimiento de Str. thermophilus y Lb. bulgaricus con el desarrollo de aroma resultante, con 2.5% de inoculación.*
Las curvas se han obtenido a partir de datos ofrecidos por CHr Hansen A/S.

Durante el período de incubación es esencial que la persona responsable de producción regularmente controle el desarrollo de acidez y que siga las rutinas que permitan conseguir los resultados óptimos.

El manejo cuidadoso de todos los cultivos de fermentos es un aspecto muy importante del procesado de los productos lácteos acidificados. Por lo tanto, esta tarea la ha de llevar a cabo siempre personal bien adiestrado.

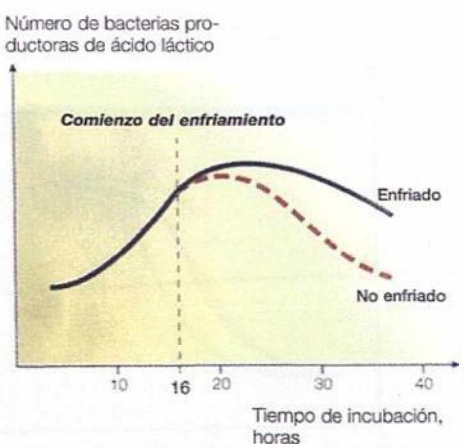


Fig. 10.8 *Crecimiento de bacterias productoras de ácido láctico con y sin enfriamiento al final de la incubación.*

Enfriamiento del cultivo

El enfriamiento comienza cuando se ha alcanzado una determinada acidez (empírica) para detener el crecimiento bacteriano y conservar la actividad del fermento en un nivel alto. La Figura 10.8 muestra el transcurso del desarrollo de un fermento ordinario formador de ácido láctico, inoculado con un 1% de cultivo madre a 20°C.

Normalmente se realiza el enfriamiento hasta 10-12°C cuando el cultivo se va a utilizar dentro de las 6 horas siguientes. Si el cultivo necesita ser almacenado durante un período largo, mayor de 6 horas, se aconseja enfriar hasta unos 5°C.

Para grandes producciones, o para períodos de producción de más de un turno es más conveniente preparar los fermentos a intervalos regulares de, por ejemplo, 4 horas. Esto significa que los cultivos activos están disponibles siempre, haciéndose más fácil seguir las condiciones de proceso establecidas y asegurar una alta calidad en los productos finales.

Conservación de los fermentos

Se ha investigado mucho la mejor manera de tratar los cultivos de forma que se preserve su actividad durante el almacenamiento. Uno de estos métodos es la

congelación. Cuanto más baja es la temperatura, mejor se mantienen los cultivos. La congelación con nitrógeno líquido a -160°C y el almacenamiento a esta temperatura conserva muy bien los fermentos.

Las formas modernas de los fermentos -concentrados, congelados o liofilizados- se pueden almacenar durante un tiempo considerable si se siguen las indicaciones de los suministradores.

La Tabla 10.3 muestra las recomendaciones de la empresa Chr Hansen A/S, de Copenhague (Dinamarca).

Es interesante remarcar que los fermentos congelados necesitan temperaturas más bajas que los fermentos liofilizados. Los primeros, además, se suministran en cajas de poliestireno aisladas embaladas con hielo seco. El tiempo de tránsito no debe exceder las 12 horas. Los liofilizados, por otro lado, se pueden transportar a temperaturas de hasta 20°C y durante un tiempo de hasta 10 días sin disminuir su vida útil inicial, si son almacenados a la temperatura recomendada tras su llegada a las instalaciones del comprador.

Tabla 10.3

Condiciones de almacenamiento y vida útil de algunos fermentos concentrados (Chr Hansen A/S)

Tipo de cultivo	Almacenamiento	Vida útil, meses
1. Liofilizado DVS	Congelador, a menos de -18°C	mínimo 12
2. Congelado DVS	Congelador, a menos de -45°C	mínimo 12
3. Liofilizado REDI-SET	Congelador, a menos de -18°C	mínimo 12
4. Congelado REDI-SET	Congelador, a menos de -45°C	mínimo 12
5. DRI-VAC	Refrigerador a menos de +5°C	mínimo 12

1. Cultivo liofilizado, superconcentrado (para inoculación directa del producto)
2. Congelado
3. Cultivo liofilizado, concentrado (para preparación de cultivo industrial)
4. Cultivo congelado, concentrado (para preparación de cultivo industrial)
5. Cultivo liofilizado en forma de polvo (para preparación de cultivo madre)

Preparación de fermentos en condiciones asépticas

Desde la introducción de la nueva generación de fermentos concentrados, congelados y liofilizados, se tiene una pequeña demanda de un equipamiento específico para la producción aséptica de fermentos en las industrias lácteas. Sin embargo, esto no quiere decir que la necesidad de higiene en la propagación de fermentos pueda ser despreciada. Las recomendaciones dadas por los suministradores de los nuevos tipos de fermentos se deben seguir cuidadosamente para obtener unos resultados óptimos.

Donde se precise aún una preparación de fermento tradicional, el procedimiento se puede llevar a cabo tal como se indica a continuación.

En las Figuras 10.10 y 10.11 se ilustra un sistema típico para la producción bajo condiciones asépticas de un fermento industrial a partir de un fermento intermedio, también producido bajo condiciones asépticas. Se aplican las siguientes condiciones:

1. El cultivo madre se prepara tradicionalmente en botellas de 100 ml provistas de tapa con membrana.
2. La botella se llena con leche desnatada, se mete en autoclave, y se enfría hasta la temperatura apropiada de inoculación.
3. El cultivo comercial se inyecta, con una jeringa esterilizada y a través de la membrana, en el interior de la botella para producir el cultivo madre.
4. Después de un período adecuado de incubación y un enfriamiento posterior, el cultivo madre se inocula en leche, normalmente leche desnatada, que se utilizará como cultivo intermedio. La leche se calienta antes de nada a una temperatura superior a 95°C durante 30-45 minutos y se enfría después hasta la temperatura apropiada de incubación. El calentamiento y el enfriamiento se realizan en incubadores especialmente diseñados.

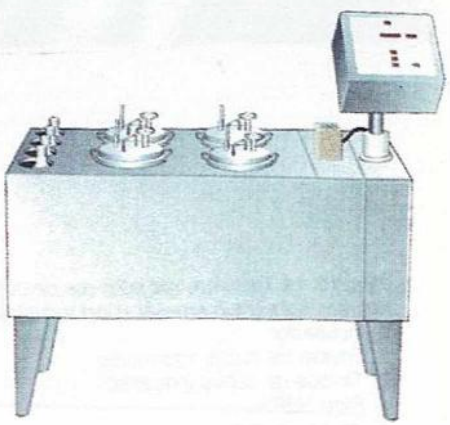


Fig. 10.9 *Incubador con cuatro envases intermedios y cuatro compartimentos para frascos de cultivo madre. La temperatura de baño de agua de calentamiento se controla de forma cuidadosa desde el panel (Laboratorios Wiesby, Alemania).*

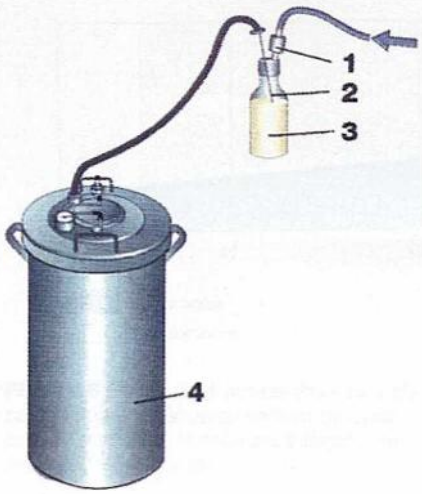


Fig. 10.10 *Transferencia aséptica de cultivo madre al envase de cultivo intermedio.*
1. Filtro estéril
2. Aguja aséptica
3. Frasco de cultivo madre
4. Envase de cultivo intermedio

5. Tras un adecuado periodo de incubación y enfriamiento hasta unos 10-12ºC, el cultivo intermedio se transfiere por desplazamiento con aire filtrado a través de un tubo hasta un tanque de cultivo industrial.
6. Antes de ser inoculada la leche, normalmente leche desnatada, se calienta por circulación del medio de calentamiento y refrigerante a través de la camisa del tanque. El aire que se suministra y que sale del tanque pasa a través de un filtro HEPA (del inglés High Efficiency Particle Air).

Tanques de cultivo industrial

La práctica normal es utilizar dos tanques de forma rotativa para la producción de cultivo industrial. Uno contiene el cultivo o starter listo para su uso en la producción del día, mientras que el starter para el día siguiente está siendo preparado en el otro.

Los tanques han de ser de diseño higiénico, por ejemplo herméticamente sellados y con triple camisa. También deben ser capaces de aguantar presiones negativas de hasta 30 kPa (0.3 bar) y presiones positivas de hasta 100 kPa (1 bar). Los agitadores deben ser de doble sello y con accionamiento mediante motores de doble velocidad. Además, deben instalarse con filtros HEPA (4) para excluir infecciones procedentes del aire que se introduce cuando el tanque se enfría después de la limpieza y cuando el medio de calentamiento se enfría hasta la temperatura de incubación.

El tanque de cultivo industrial se puede equipar con un pHmetro (7) estacionario integrado, diseñado para resistir las grandes diferencias de temperatura que ocurren durante la limpieza y el tratamiento térmico del sustrato.

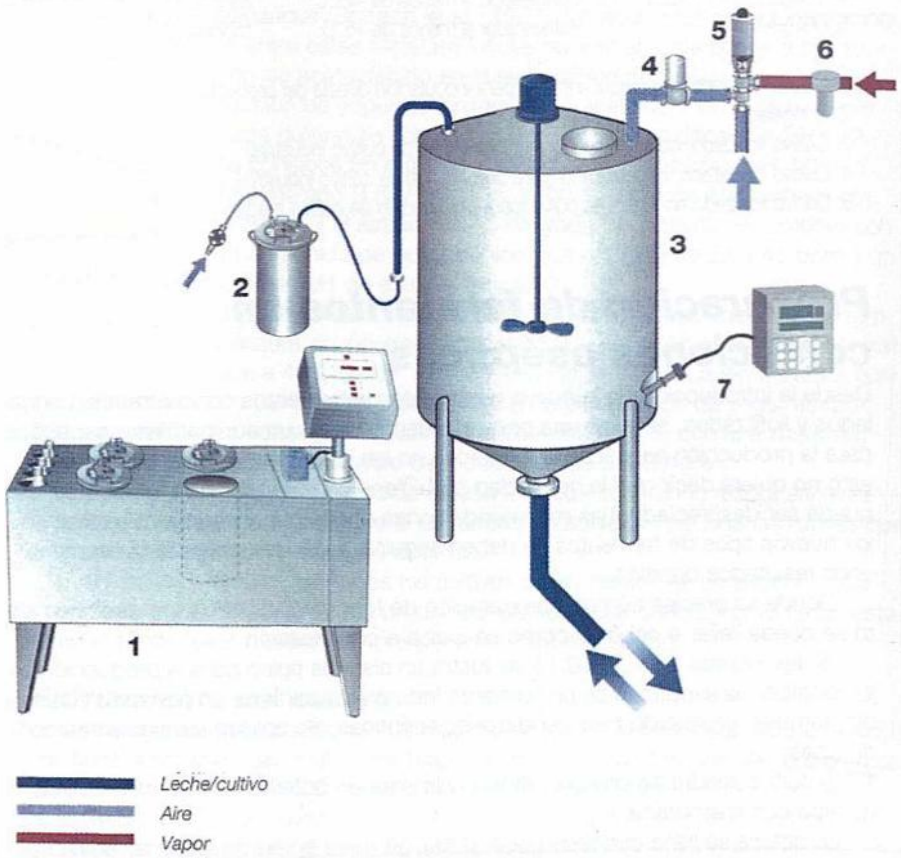


Fig. 10.11 *Transferencia aséptica de cultivo intermedio al tanque de cultivo industrial.*
1. Incubador
2. Envase de cultivo intermedio
3. Tanque de cultivo industrial
4. Filtro HEPA
5. Válvula de aire
6. Filtro de vapor
7. Unidad de medida del pH

Capítulo 11

Productos lácteos acidificados

Los productos lácteos preparados por medio de la fermentación del ácido láctico (ej., yogur) o una combinación de ésta y fermentación con levaduras (ej., Kefir) se denominan leches fermentadas o acidificadas. En este capítulo se utilizará el término acidificado.

Leche acidificada es el nombre del colectivo que incluye productos tales como el *yogur, ymer, kefir, mazada acidificada, filmjölk* (leche ácida escandinava), *nata acidificada y koumiss* (un producto a base de leche de yegua). Este nombre genérico deriva del hecho de ser la leche la materia prima que se inocula con un cultivo de fermentos que convierte parte de la lactosa en ácido láctico. En ese proceso de conversión se producen también otras sustancias tales como el anhídrido carbónico, ácido acético, diacetilo, acetaldehido, y algunas otras que dan a los distin-

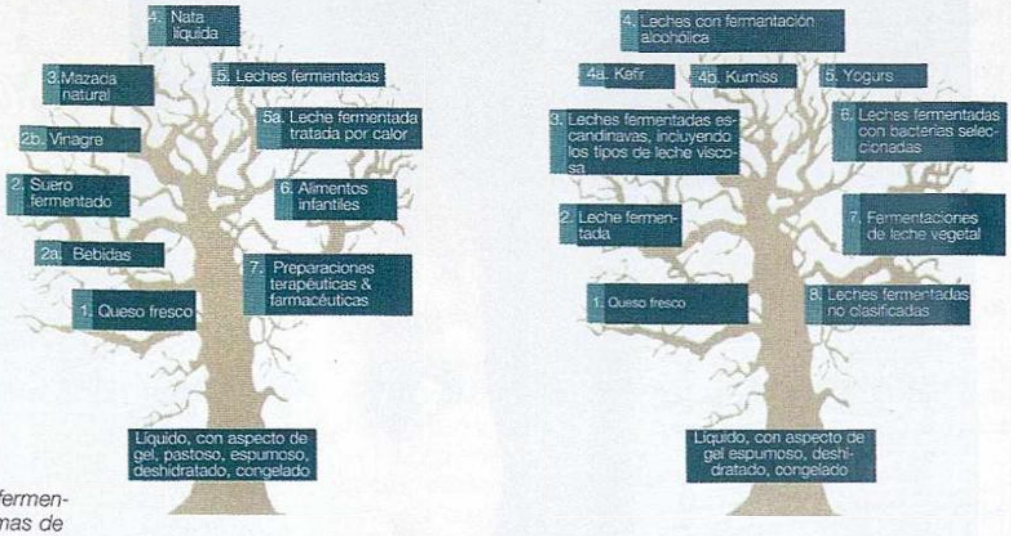


Fig. 11.1 *Los productos lácteos fermentados o acidificados son como ramas de árboles genealógicos.*

tos productos sus características de fresco sabor y aroma. Los microorganismos utilizados en la producción de kefir y kourniss producen también alcohol etílico.

Los productos lácteos acidificados proceden de Oriente Próximo y se hicieron muy populares en la Europa Central y Oriental. El primer ejemplo de leche acidificada fue presumiblemente producido de forma accidental por nómadas. La leche se volvía "ácida" y coagulaba bajo la influencia de ciertos microorganismos. Por suerte, las bacterias eran del tipo acidófilo, no dañinas, en vez de ser organismos productores de sustancias tóxicas.

Fig. 11.2 *El Monte Elbrus de la cadena montañosa del Cáucaso es el lugar de origen del Kefir y el Yogur.*

La leyenda

La leyenda dice que el yogur y el kefir nacieron en las laderas del Monte Elbrus en la cordillera del Cáucaso por un milagro de la Naturaleza. Microorganismos de varios tipos cayeron en una cántara de leche al mismo tiempo y a la temperatura adecuada, y comprobaron que podían vivir en simbiosis.

En la ladera sur del M. Elbrus, los microorganismos que preferían temperaturas relativamente altas, 40-45ºC, cayeron juntos en una cántara de leche que probablemente pertenecía a un nómada turco, y se obtuvo lo que los turcos denominaron "Yogurut". Algunas fuentes dicen que este nombre se introdujo en el siglo VIII y que se cambió en el siglo XI al nombre actual *yoghurt*.

Después se ha llegado a afirmar, pudiendo haber quizá mucha verdad en la historia, que el yogur actúa como un antídoto contra el envejecimiento humano. De tal manera que si uno se encuentra un cosaco galopando en algún valle del Cáucaso, ¡probablemente tendrá unos 130 o 140 años de edad!.

El kefir, tal como indica la leyenda, fué creado en la ladera norte por medio de una mezcla de microorganismos que no son tan amantes del calor. Se desarrollan mejor a 25-28ºC. El nombre kefir deriva probablemente de la lengua turca. La primera sílaba del nombre, kef, es del turco y significa placentero, que era probablemente el primer comentario del pastor sobre el gusto.

El kefir contiene diferentes tipos de microorganismos, entre los que las levaduras son las más famosas ya que son capaces de formar alcohol. El contenido máximo de alcohol del kefir es de un 0.8%.

Necesidades generales de la producción de leches acidificadas

La conversión de lactosa en ácido láctico tiene un efecto conservador sobre la leche. El bajo pH de la leche acidificada inhibe el crecimiento de las bacterias de la putrefacción y de otros organismos perjudiciales. De esta forma se prolonga la vida útil del producto. Por otra parte, la leche acidificada es un medio muy favorable para levaduras y mohos que causarian olores y sabores desagradables si se les permitiese infectar los productos lácteos.

El sistema digestivo de algunas personas carece de la enzima lactasa. Por ello, la lactosa no será descompuesta en el proceso digestivo en azúcares más sim-

ples. Este tipo de personas puede consumir sólo muy pequeños volúmenes de leche normal. Sin embargo, pueden tomar productos lácteos acidificados, en los que la lactosa ha sido ya parcialmente desdoblada por las enzimas bacterianas.

En la producción de leche acidificada se deben crear las mejores condiciones posibles para el crecimiento del cultivo de fermentos. Ello se consigue mediante tratamiento térmico de la leche, de forma que se inhibe el desarrollo de microorganismos que pudiesen competir con el citado cultivo. Por otra parte, la leche debe mantenerse a la temperatura óptima para el desarrollo del cultivo de que se trate. Cuando se ha alcanzado el sabor y aroma deseados, la leche acidificada debe enfriarse rápidamente con objeto de detener el proceso fermentativo. Si el tiempo de fermentación es muy largo o muy corto se estropeará el sabor del producto, así como su consistencia.

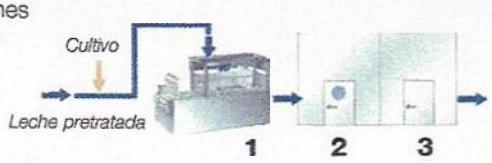


Fig. 11.3 *Yogur firme.*
1. Llenadora de tarrinas
2. Cámara de incubación
3. Cámara de enfriamiento rápido.

Además de un buen sabor y un buen aroma, la leche acidificada debe tener una apariencia y consistencia adecuadas. Estas características son determinadas por medio de una adecuada elección de los parámetros de proceso. El adecuado tratamiento térmico y homogeneización de la leche, algunas veces combinado con métodos para incrementar el contenido de SNG, como en la leche destinada a yogur, son las bases esenciales para conseguir un coágulo adecuado durante el periodo de incubación.

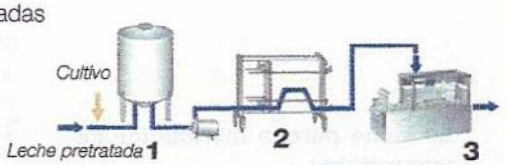


Fig. 11.4 *Yogur batido.*
1. Tanque de incubación
2. Enfriador
3. Llenadora de tarrinas.

A continuación se describen algunos de los productos lácteos acidificados más importantes. Las técnicas de producción para otros productos similares es muy parecida; por ejemplo, el tratamiento previo de la leche es el mismo. La descripción del proceso para otros productos se referirá, principalmente, a las etapas de producción, que son diferentes a las del yogur.

Yogur

De todos los productos lácteos acidificados, el yogur es el más conocido y popular en casi todo el mundo. El consumo más alto de yogur se da en los paises ribereños del Mediterráneo, en Asia y en Europa Central.

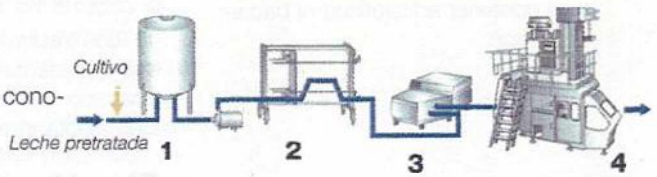


Fig. 11.5 *Yogur para beber.*
1. Tanque de incubación
2. Enfriador
3. Homogeneizador
4. Máquina de llenado.

La consistencia, sabor y aroma varia de un lugar a otro. En algunas partes, el yogur se produce bajo la forma de un líquido altamente viscoso, mientras que en otros paises presenta la apariencia de un gel blando. El yogur también se produce en forma congelada para postres o como una bebida. El aroma y sabor del yogur difiere del de otros productos acidificados. Sus sustancias aromáticas volátiles incluyen pequeñas cantidades de ácido acético y acetaldehido.

El yogur se clasifica normalmente de la forma siguiente:

- Yogur firme, incubado y enfriado en el mismo envase, Figura 11.3.
- Yogur batido, que es incubado en depósitos y enfriado antes de su envasado, Figura 11.4.
- Yogur líquido, similar al yogur batido, aunque el coágulo se rompe hasta obtener una forma líquida antes de su envasado, Figura 11.5.
- Yogur congelado incubado en tanques y congelado como un helado de crema, Figura 11.6.
- Yogur concentrado incubado en tanques, concentrado y enfriado antes de ser envasado. Este tipo es a veces llamado yogur colado, o labneh, labaneh, Figura 11.7.

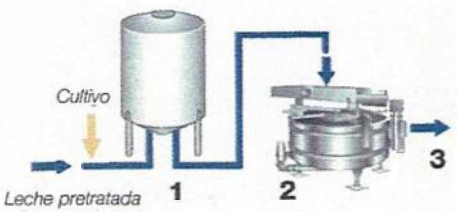


Fig. 11.6 *Yogur congelado.*
1. Tanque de incubación
2. Congelador de barras de helado de crema
3. Al túnel de endurecimiento

Yogur con aromas o frutas

El yogur aromatizado es muy popular, aunque la tendencia de vuelta hacia el yogur natural se aprecia claramente en algunos mercados. Entre los aditivos más comunes utilizados en el yogur están las frutas y bayas en jarabe, procesadas o como purés. La proporción de fruta es normalmente de alrededor del 15%, del cual el 50% es azúcar.

Fig. 11.7 *Yogur concentrado.*
1. Tanque de incubación
2. Desnatadora
3. Llenadora de tarrinas.

La fruta se mezcla con el yogur antes o durante el envasado. Se puede también colocar en el fondo del envase antes de llenarlo con yogur. Otra alternativa es envasar la fruta de forma separada en una "copa doble" integrada en la copa que constituye el envase.

En ocasiones, también se aromatiza el yogur con diversas esencias, tales como la vainilla, café, miel, etc. También se añaden colorantes y azúcares en forma

de sacarosa, glucosa o aspartamo, o de edulcorante dietético libre de azúcar, junto con los productos aromáticos.

Con objeto de conseguir la consistencia deseada se añaden a veces sustancias estabilizantes.

Los aditivos aumentan el contenido en materia seca del yogur final. A continuación se indica la composición típica de un yogur de frutas:

- Grasa 0.5-3 %
- Lactosa 3-4.5 %
- Sólidos lácteos no grasos (SNG) 11-13 %
- Estabilizantes, en su caso 0.3-0.5 %
- Fruta 12-18 %

Factores que afectan la calidad del yogur

Diversos factores deben ser cuidadosamente controlados durante el proceso de fabricación con objeto de obtener un yogur de alta calidad, con un adecuado sabor, aroma, viscosidad, consistencia, apariencia y libre de suero separado y con un prolongado periodo de conservación :

- Elección de la leche
- Normalización de la leche
- Aditivos lácteos
- Desaireación
- Homogeneización
- Tratamiento térmico
- Preparación de los cultivos
- Diseño de la planta

La leche para la fabricación de yogur debe:
- tener un recuento bajo de bacterias
- no contenenr enzimas y sustancias químicas que puedan retardar el desarrollo del cultivo de yogur
- no contener antibióticos ni bacteriófagos

Los tratamientos previos de la leche incluyen entonces toda una serie de medidas que afectan todas ellas de forma muy importante a la calidad del producto acabado. El tratamiento mecánico al que se somete el yogur durante su produccion afecta también a su calidad.

Elección de la leche

La leche para la producción de yogur debe ser de la más alta calidad bacteriológica. Debe tener un bajo contenido en bacterias y sustancias que puedan impedir el desarrollo de los cultivos típicos del yogur. La leche no debe contener antibióticos, bacteriófagos, ni residuos de soluciones de limpieza o agentes desinfectantes. Por ello, la industria lactea debe obtener la leche para la producción de yogur de ganaderos seleccionados, con prácticas de producción aprobadas. Por otra parte, dicha leche debe ser cuidadosamente analizada en la industria láctea.

Normalización de la leche

El contenido en grasa y en sólidos de la leche se normalizan habitualmente de acuerdo con las normas y principios FAO/OMS que se indican a continuación.

Grasa

El yogur puede tener un contenido en grasa de 0 a 10%. Sin embargo, lo más habitual es un contenido en grasa de 0.5-3.5%. El yogur se puede clasificar en los siguientes grupos, según el código y principios establecidos por la FAO/OMS:

• Yogur	Contenido graso mínimo	3%
• Yogur parcialmente desnatado	Contenido graso máximo, menor del	3%
	Contenido graso mínimo, más del	0.5%
• Yogur desnatado	Contenido graso máximo	0.5%

Contenido en materia seca (MS)

Según lo establecido por la FAO/OMS, el contenido mínimo de sólidos no grasos de origen lácteo debe ser del 8.2%. El incremento en el contenido total de MS, especialmente de la proporción de caseína y proteínas del suero, dará lugar a un yogur de más consistencia, reduciéndose la tendencia a la separación del suero.

Los métodos más comunes para normalizar el contenido de MS son:

- Evaporación, donde normalmente se evapora un 10-20% del volumen de la leche.
- Adición de leche desnatada en polvo, normalmente hasta el 3%.

- Adición de leche concentrada.
- Adición de retentato de UF de leche desnatada.

Aditivos en la leche

En la producción de yogur se pueden añadir a la leche sustancias estabilizantes y azúcar o edulcorantes.

Azúcar o edulcorantes

El disacárido sacarosa, o un monosacárido como la glucosa, se pueden añadir solos o en combinación con frutas. Para satisfacer a las personas a dieta, entre los cuales los diabéticos constituyen una importante categoría, se deben utilizar edulcorantes. Un edulcorante no tiene valor nutritivo pero proporciona el sabor dulce incluso si se añade en pequeñas dosis. (Hay que remarcar que un edulcorante no se puede utilizar como conservante para leche condensada edulcorada).

La fruta normalmente contiene alrededor de un 50% de azúcar, que equivale a una determinada cantidad de edulcorante, por lo que la dulzura requerida se puede conseguir normalmente mediante la adición de un 12-18% de fruta.

Se ha de señalar que la adición de demasiada cantidad de azúcar (más del 10%) a la leche antes del período de inoculación/incubación tiene un efecto adverso sobre las condiciones de fermentación debido a que cambia la presión osmótica de la leche.

Sustancias estabilizantes

Los coloides hidrófilos tienen la propiedad de ligar agua. Con ellos se aumenta la viscosidad del producto y contribuyen a la prevención de la separación de suero en el mismo. El tipo de estabilizante y la proporción en que debe ser añadido se determina de forma experimental por cada fabricante. Si se utiliza un exceso de estabilizante, o éste no es el correcto, el producto puede adquirir una consistencia dura y elástica, como de goma.

Si se produce de forma correcta, el yogur natural no necesita la adición de estabilizantes, ya que se origina un gel fino y consistente con una alta viscosidad de forma natural. Los estabilizantes se emplean en la producción de yogur con frutas, y yogur pasteurizado. Los estabilizantes (0.1-0.5 %) tales como la gelatina, pectina, almidón y agar-agar son las sustancias más comunmente usadas.

Los estabilizantes para yogur son:

- gelatina
- pectina
- agar-agar
- almidón

Desaireación

El contenido de aire de la leche utilizada en la fabricación de productos lácteos acidificados debe ser tan bajo como sea posible. Sin embargo es inevitable que tenga lugar una cierta entrada de aire en la leche si el contenido de SNG se aumenta mediante la adición de leche en polvo. Si se hace esto, la leche se ha de desairear en una etapa de proceso dedicada a este fin.

Tabla 11.1

Influencia de la homogeneización y el tratamiento térmico sobre la viscosidad de una leche acidificada.

Presión a 60°C MPa	Viscosidad = tiempo de flujo, en segundos a 20°C Leche past. ordinaria (72°C/20s)	Leche calentada a alta temperatura (95°C/5 min)
0	5.7	15.0
2.5	5.6	14.6
5.0	7.1	15.8
7.5	8.0	19.0
10.0	8.9	22.1
15.0	10.4	28.7
20.0	11.2	30.2
30.0	13.8	32.7

Por cortesía de la Swedish Dairies Association "SMR), pedt. C-lab., Malmö/Lund, Suecia.

Cuando el contenido de SNG se aumenta por evaporación, la desaireación es una parte de ese proceso. Mediante la desaireación se consiguen las siguientes ventajas:

- Mejoran las condiciones de trabajo del homogeneizador.
- Menos riesgo de ensuciamiento durante el tratamiento térmico.
- Estabilidad y viscosidad mejoradas en el yogur finalmente obtenido.
- Eliminación de malos aromas volátiles (desodorización).

Homogeneización

Los motivos principales de la homogeneización de la leche que se va a utilizar en la fabricación de productos lácteos acidificados son prevenir la separación de la nata durante el periodo de incubación y asegurar una distribución uniforme de la grasa de la leche.

La estabilidad y consistencia de las leches acidificadas se ven mejoradas por la homogeneización, incluso en aquellos productos con bajo contenido en grasa.

La homogeneización con el posterior calentamiento a alta temperatura, normalmente a 90-95ºC durante alrededor de 5 minutos, tiene una muy buena influencia sobre la viscosidad.

La Tabla 11.1 ilustra la doble influencia sobre la viscosidad de una leche acidificada (filmjölk sueco; 3% de grasa y alrededor de 8.7% de SNG) cuando se pretrata a varias presiones de homogeneización y temperaturas de calentamiento. La temperatura de homogeneización es de 60ºC en todos los casos.

La viscosidad se mide con un simple viscosímetro (viscosímetros SMR) a 20ºC, y el resultado se da en segundos para 100 ml de producto que pasa por una boquilla de un cierto diámetro. La Figura 11.8 muestra un viscosímetro provisto de boquillas intercambiables, cada una de un diámetro de entre 2 y 6 mm.

Fig. 11.8 *Viscosímetro SMR.*

La viscosidad de la corriente de leche homogeneizada circula en paralelo a la presión de homogeneización independientemente de que se haya sometido a un tratamiento térmico ordinario o no. La tabla también muestra que el tratamiento térmico a alta temperatura hace el producto más viscoso.

Como recomendación general, la leche se ha de homogeneizar a 20-25 Mpa y 65-70ºC para obtener unas propoedades físicas óptimas en el producto. La homogeneización se utiliza frecuentemente incluso en la producción de leches acidificadas de bajo contenido en grasa.

La cuestión de si la homogeneización debe ser de doble o simple etapa es a veces discutida. Generalmente, esto es un tema de diseño del sistema de homogeneización, en particular del cabezal de homogeneización.

Tratamiento térmico

La leche se trata térmicamente antes de proceder a la inoculación de los cultivos. Ello se hace con objeto de:

- mejorar las propiedades de la leche como sustrato para las bacterias del cultivo industrial;
- asegurar que el coágulo del yogur terminado sea firme;
- reducir el riesgo de separación de suero en el producto terminado.

Se consiguen resultados óptimos por medio del tratamiento térmico de la leche a 90-95ºC durante un tiempo de mantenimiento de unos 5 minutos. Esta combinación tiempo/temperatura desnaturaliza alrededor del 70-80% de las seroproteinas. En particular la β-lactoglobulina, que es la principal seroproteina, interactúa con la k-caseina, con lo que se facilita que el yogur adquiera "cuerpo".

El tratamiento UHT y la esterilización de la leche destinada o no a la producción de leches acidificadas, tienen la misma influencia favorable sobre la viscosidad, por razones aún no muy bien conocidas.

Elección del fermento

Los laboratorios de fermentos actualmente utilizan técnicas avanzadas para producir fermentos del yogur para satisfacer requerimientos específicos de sabor y viscosidad. Algunos ejemplos de propiedades del producto final que se pueden conseguir son:

- Alta viscosidad con bajo contenido de acetaldehido y un pH final relativamente alto.
- Baja viscosidad y contenido de acetaldehido medio, deseable para yogur líquido, etc.

Preparación del cultivo

El manejo del cultivo para la producción de yogur (y todas las otras leches fermentadas) requiere una higiene y precisión máximas. Los métodos básicos de preparación de cultivo tradicional y las nuevas tendencias se discuten en el capítulo 10 "Preparación de cultivos y starters".

En cualquier caso es necesario recalcar una vez más que los cultivos están disponibles actualmente en el merecado como concentrados, congelados y liofilizados, y están siendo utilizados más o menos ampliamente. De esta forma se evita la necesidad de invertir en una sala separada de cultivo -un ahorro que debe ser confrontado con los costes de abastecimiento y de almacenamiento apropiado de los cultivos. La gran ventaja es, sin embargo, que la inoculación directa de la leche con un cultivo concentrado minimiza el riesgo de contaminación, ya que se evitan las etapas intermedias de propagación.

Diseño de la planta

El coágulo formado durante la fermentación es sensible al tratamiento mecánico. Esto hace que sea muy importante la adecuada selección y el correcto dimensionado de tuberías, válvulas, bombas, enfriadores, etc.

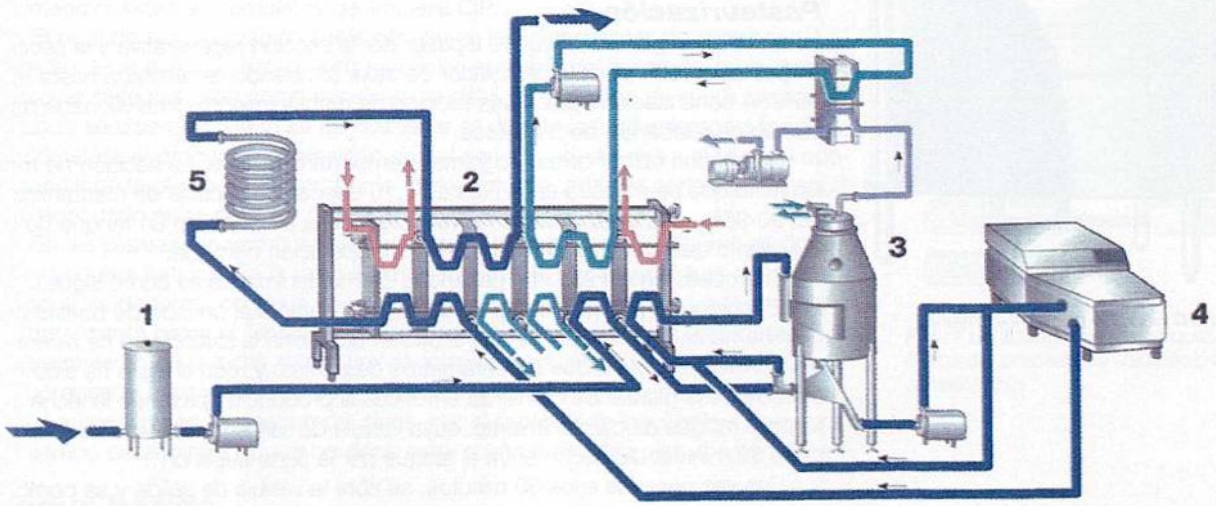


Fig. 11.9 *Tratamiento previo general de los productos lácteos fermentados.*

1. *Tanque pulmón*
2. *Intercambiador de calor de placas*
3. *Evaporador*
4. *Homogeneizador*
5. *Tubo de mantenimiento*

Leche/yogur
Medio de enfriamiento
Medio de calentamiento
Vapor

Líneas de producción

El pretratamiento de la leche es el mismo, independientemente de si se produce yogur fijo o batido. Este pretratamiento incluye la normalización de la grasa y el contenido en materia seca, un tratamiento térmico y la homogeneización.

La Figura 11.9 muestra un ejemplo de diseño de una linea de proceso para producción de yogur. Los tanques de almaceramiento de leche, desde los que se bombea la leche a la linea de proceso, no aparecen en la figura. Se supone que la leche se normaliza hasta el contenido de grasa necesario antes de entrar en la linea de proceso. En el ejemplo la normalización del contenido de materia seca tiene lugar en un evaporador de la misma linea de proceso. Si se ajusta el contenido de materia seca por adición de leche en polvo, el equipo utilizado es similar al descrito en el capítulo 18 "Leche recombinada". Se aconseja desairear la leche con contenido incrementado de materia seca mediante adición de leche en polvo, para reducir el riesgo de separación del lactosuero.

Cualquier aditivo, como estabilizantes, vitaminas, etc., se pueden añadir a la leche antes de su tratamiento térmico. Desde el tanque de regulación la leche se bombea hasta el intercambiador de calor (2), donde primero se precalienta en el cuerpo de regeneración hasta unos 70°C y después se calienta hasta 90°C en la segunda sección.

Evaporación

Desde el intercambiador de calor, la leche caliente pasa a un envase a vacío (3), donde se evapora un 10-20% del agua presente en la leche. La proporción de agua evaporada depende del contenido deseado de materia seca (MS) para la leche. Si se evapora un 10-20%, el contenido de MS se incrementará en aproxima-

damente un 1.5-3.0%. El grado de evaporación se controla mediante la temperatura de la leche a la entrada a la cámara de vacío, el caudal de leche y el vacío practicado. Parte del agua evaporada se utiliza para el precalentamiento de la leche entrante. Esto mejora la economía térmica de la planta.

Una cierta cantidad de leche debe recircularse a través del depósito a vacío, con objeto de obtener el grado de evaporación deseado. En cada paso se evapora un 3-4 % de agua, de forma que para alcanzar un 15% de evaporacion se debe recircular el producto entre 4 y 5 veces la capacidad del pasteurizador. La temperatura de la leche cae desde 90ºC hasta 70ºC durante la evaporación.

El equipo de evaporación descrito está diseñado para capacidades de hasta 8.000 litros/hora. Para capacidades superiores (hasta 30.000 l/h) se utilizan evaporadores de película descendente.

La evaporación de un 10-20% del volumen de la leche incrementa el contenido de MS de la leche en un 1.5-3%.

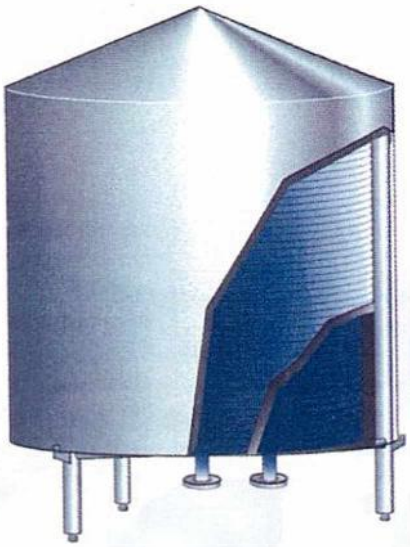


Fig. 11.10 *Sección de mantenimiento tubular.*

Homogeneización

Después de la evaporización, la leche continúa hasta el homogeneizador (4), y se homogeneiza a una presión de aproximadamente 20-25 MPa (200-250 bar).

Pasteurización

La leche homogeneizada vuelve a pasar por la sección regenerativa y la sección de pasteurización del intercambiador de calor (2), siendo recalentada hasta 90-95ºC. A continuación pasa a una sección de mantenimiento dimensionada para un tiempo de residencia de 5 minutos.

Se pueden utilizar otros programas tiempo/temperatura. La sección de mantenimiento que se muestra en la Figura 11.10 ofrece una eficacia de mantenimiento del 90-95%, que es apreciablemente superior a la obtenida en un tanque de mantenimiento que se integra en una planta de operación continua.

El proceso en plantas con un tanque de mantenimiento es como sigue:

El tanque de mantenimiento es by-pasado durante el periodo de puesta en marcha hasta que se alcanza una situación estacionaria (cuando se ha alcanzado el valor deseado de todos los parámetros de control) y toda el agua ha sido desplazada de la planta. Se comienza entonces la producción pasando la leche caliente al tanque de mantenimiento, cuya válvula de salida permanece cerrada durante 30 minutos. La leche entra al tanque por la parte superior.

Una vez pasados esos 30 minutos, se abre la válvula de salida y se bombea la leche al lado de corriente descendente del pasteurizador con el mismo caudal que el de envasado. Por esto el proceso es continuo. El sistema ofrece una eficiencia de mantenimiento del 12-15%, es decir si se considera una eficiencia del 13% el tiempo de mantenimiento medio será de 13x30/100 = 3.9 minutos, aproximadamente 4 minutos. La solución con tanque de mantenimiento genera algunos problemas de diseño de la planta debido a que la leche fluye sólo en el lado de corriente ascendente de las placas del intercambiador de calor durante la primera media hora de llenado, provocando perturbaciones en el programa de temperaturas. Sin embargo, se puede salvar este problema con una solución de planta más complicada.

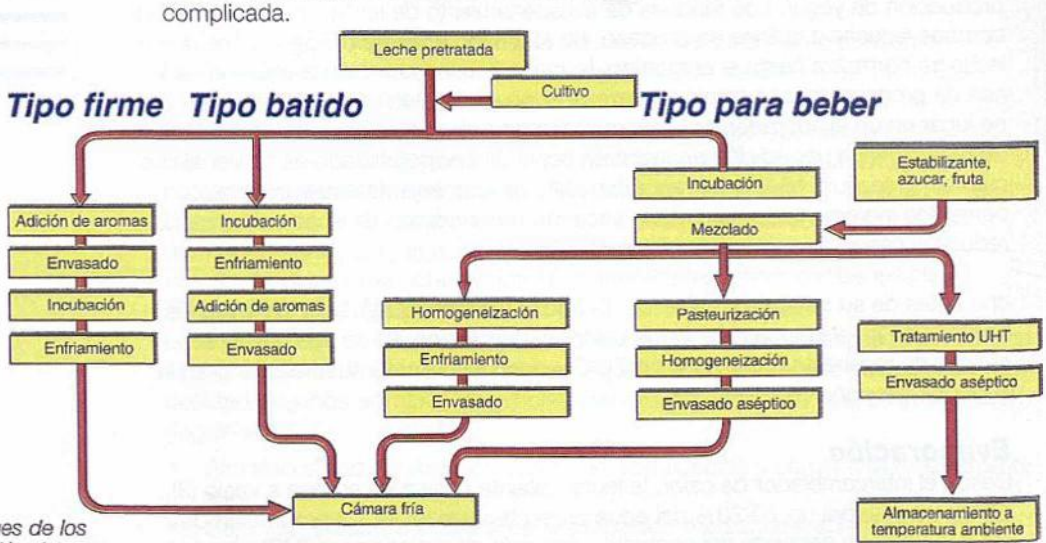


Fig. 11.11 *Diagrama de bloques de los pasos del proceso de elaboración de yogur firme, agitado y para beber.*

Enfriamiento de la leche

La leche se enfría después de ser pasteurizada, primero en la sección regenerativa y después con agua hasta la temperatura deseada de inoculación, normalmente de 40-45ºC, o si se trata de producir yogur firme y no se tiene la misma capacidad de pretratamiento que de envasado, se enfría hasta una temperatura inferior a 10ºC, preferiblemente 5ºC.

Diseño de la planta de yogur

Cuando la leche que se va a utilizar en la producción de yogur ha sido pretratada y enfriada hasta la temperatura de inoculación, el proceso que se sigue depende del tipo de yogur que se vaya a producir (yogur firme, yogur batido, líquido, congelado o concentrado). El diagrama de bloques de las Figuras 11.11-11.13 muestra las distintas etapas de producción para cada proceso.

La calidad del yogur en cuanto a su textura y sabor depende del diseño de la planta, del tratamiento previo de la leche y del tratamiento del producto. En la actualidad se diseñan las plantas de producción para satisfacer la demanda de productos de alta calidad, tratados de forma continua y con elevadas capacidades de producción. El nivel de automatización es variable, pero normalmente en la planta se integran sistemas completos de limpieza CIP.

El nivel de automatización suele ser alto en las instalaciones de gran capacidad. Se debe evitar un tratamiento mecánico excesivo del producto, ya que puede provocar defectos tales como consistencia débil y separación de suero (sinéresis). Cuando se diseña la planta se han de tener en cuenta los tratamientos a los que se someterá el producto. La elección de los equipos adecuados y el ajuste y optimización de la planta ha de ser, por lo tanto, fruto de tratar de conseguir un equilibrio adecuado entre costes y calidad.

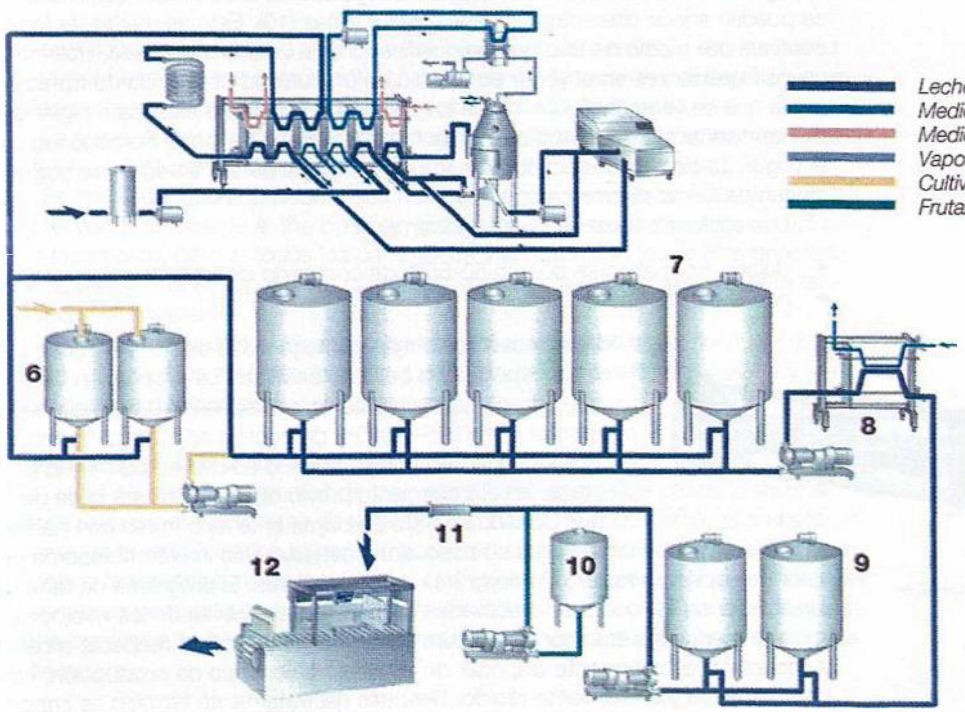
En las plantas modernas se suelen producir a la misma vez yogures de tipo firme y yogures batidos. En la producción del yogur de tipo firme el flujo de producto se controla de forma continua desde el punto en que la leche entra a la sección de pretratamiento hasta el llenado del producto. En la producción de yogur batido, el pretratamiento de la leche transcurre de forma continua hasta el punto en el cual es bombeada a los depósitos de incubación, a los que se añade el cultivo industrial. La continuidad se interrumpe, pues, por el proceso de incubación, que dura un tiempo determinado y que no debe estar sujeto a ninguna perturbación física.

Fig. 11.12 *Diagrama de bloques de los pasos del proceso de elaboración de yogur congelado (helado de yogur).*

Fig. 11.13 *Diagrama de bloques de los pasos del proceso de elaboración de yogur concentrado.*

Yogur batido

Una instalación típica para la producción continua de un volumen relativamente elevado de yogur batido aparece en la Figura 11.14.



El pretratamiento se muestra en detalle en la figura 11.9
6. Tanques de cultivo industrial
7. Tanques de incubación
8. Enfriador de placas
9. Tanques pulmón
10. Fruta/aromas
11. Mezclador
12. Envasado

Fig. 11.14 *Línea de producción de yogur batido.*

La leche pretratada y enfriada hasta la temperatura de incubación se bombea hacia uno de los depósitos de incubación (7), de forma sucesiva. Simultáneamente se dosifica en la corriente de leche un volumen predeterminado de cultivo industrial (6). Una vez que el tanque se ha llenado, comienza la agitación y continua durante un tiempo corto para asegurar una distribución uniforme del cultivo industrial.

Los depósitos de incubación están aislados con objeto de asegurar que la temperatura permanezca constante durante el proceso de incubación. Los depósitos pueden equipararse con un medidor de pH para poder controlar la producción de ácido.

En la producción normal de yogur batido el periodo de incubación es de 2.5 a 3 horas a 42-43°C cuando se utiliza el tipo normal de cultivo industrial (2.5-3% de inóculo). Un tiempo de incubación corto indica que el periodo de multiplicación (generación) es rápido. Para las bacterias típicas del yogur el periodo de generación es de unos 20-30 minutos. Para conseguir unas condiciones óptimas de calidad, se debe realizar un enfriamiento hasta 15-22°C (desde 42-43°C) dentro de la media hora siguiente a la consecución del valor de pH ideal para detener el desarrollo posterior de bacterias. (Cuando se añaden cultivos concentrados, congelados o liofilizados, directamente a los tanques de incubación de yogur, se precisa un tiempo de incubación más largo, de 4-6 horas a 43°C, ya que se tiene una fase latente más larga).

Enfriamiento del gel

En la fase final de la incubación, cuando se alcanza el pH requerido (normalmente 4.2-4.5), la temperatura del yogur debe bajarse rápidamente a 15-22°C. Esto detiene temporalmente cualquier incremento posterior de la acidez. Al mismo tiempo, el gel debe someterse a un tratamiento mecánico suave, con objeto de que el producto final tenga la consistencia correcta.

El enfriamiento se realiza en un intercambiador de calor de placas (8) de diseño especial. De esta forma se asegura un tratamiento mecánico suave del producto. La capacidad de la bomba y del enfriador se dimensiona de forma que se vacíe el depósito en 20-30 minutos, con objeto de mantener una calidad uniforme de producto. Si se utilizan cultivos con otras curvas de fermentación, lo que implica una cierta influencia sobre el tiempo de incubación, se debe adaptar el tiempo de enfriamiento.

El yogur enfriado se bombea a depósitos pulmón (9), antes de enviarse a las llenadoras (12).

Aromatización del yogur

Después de su enfriamiento a 15-22°C, el yogur está listo para su llenado. Cuando el yogur se transfiere desde los depósitos reguladores a las máquinas llenadoras se pueden añadir diferentes aromatizantes y frutas (10). Esto se realiza de forma continua por medio de una bomba dosificadora de velocidad variable, que introduce los ingredientes en el yogur por medio de una unidad de mezcla de frutas como la que se ve en la Figura 11.15. La unidad de mezcla es estática e higiénicamente diseñada para garantizar que la fruta se mezcle de forma homogénea con el yogur. La bomba dosificadora de fruta y la bomba de alimentación de yogur funcionan de forma sincrónica.

Los aditivos a base de frutas pueden ser:

- dulces, normalmente con un 50-55% de contenido de azúcar;
- naturales, no edulcorados.

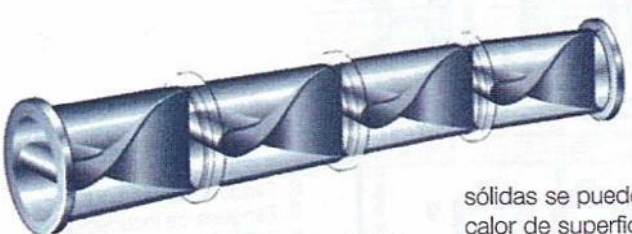


Fig. 11.15 *Mezclador de fruta construido en el interior de la tubería.*

Las frutas deben ser lo más homogéneas posible. Se puede añadir un espesante a base de pectinas. La proporción de pectina utilizada normalmente no sobrepasa el 0.5 %, que corresponde a un 0.05-0.005% de pectina en el yogur terminado. Un adecuado tratamiento térmico es una etapa muy importante en el tratamiento previo de los aditivos a base de frutas. Cuando se trata de bayas enteras o frutas con partículas sólidas se pueden utilizar para su adecuada pasteurización intercambiadores de calor de superficie rascada o depósitos con rascadores. El programa de temperaturas debe ser tal que sean inactivadas las formas vegetativas de los microorganismos, sin perjudicar el sabor y la textura de las frutas. En lo que respecta a calidad y economía, es importante disponer de un sistema continuo de producción, con calentamiento y enfriamiento rápido. Después del tratamiento térmico es importan-

te que la fruta sea envasada en envases estériles en condiciones asépticas. El deterioro de los productos lácteos acidificados con gran frecuencia se debe a una reinfección con origen en la fruta tratada inadecuadamente.

Envasado

El envasado del yogur se hace utilizando distintos tipos de máquinas llenadoras. El tamaño de los envases varía de un mercado a otro. En general la capacidad de envasado total debe ser semejante a la capacidad de la planta de pasteurización, para obtener unas condiciones óptimas de funcionamiento para todo el sistema de proceso.

Diseño de la planta

Tal como se ha mencionado, el diseño de la planta es uno de los factores importantes que afectarán a la calidad del yogur y, desde luego, todos los otros productos acidificados. La Figura 11.16 muestra las curvas de desarrollo de viscosidad del yogur batido desde el momento en que sale del tanque de incubación, via envasado y hasta pasadas 10 horas de almacenamiento refrigerado.

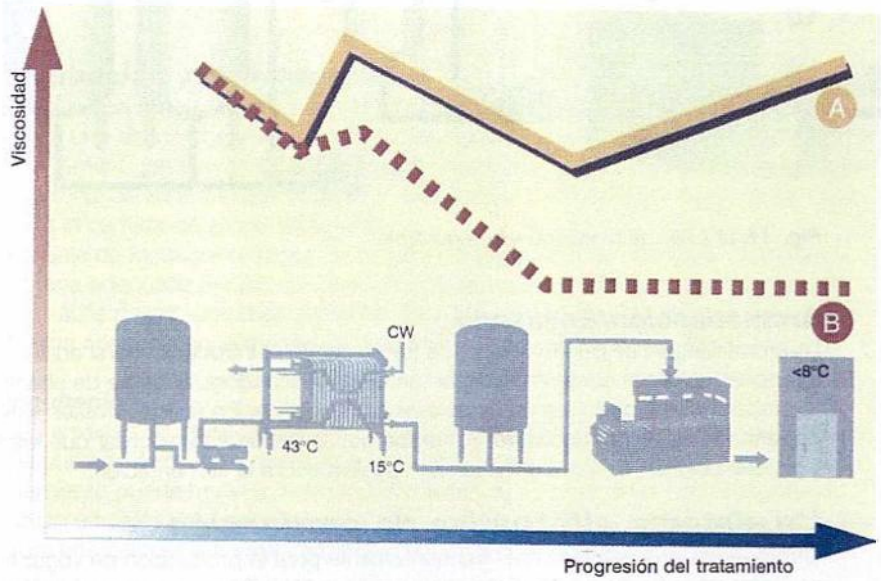


Fig. 11.16 *Desarrollo de la viscosidad del yogur agitado durante el enfriamiento, envasado y almacenamiento refrigerado.*
A. *Diseño de planta óptimo.* ***B.*** *Planta diseñada incorrectamente*

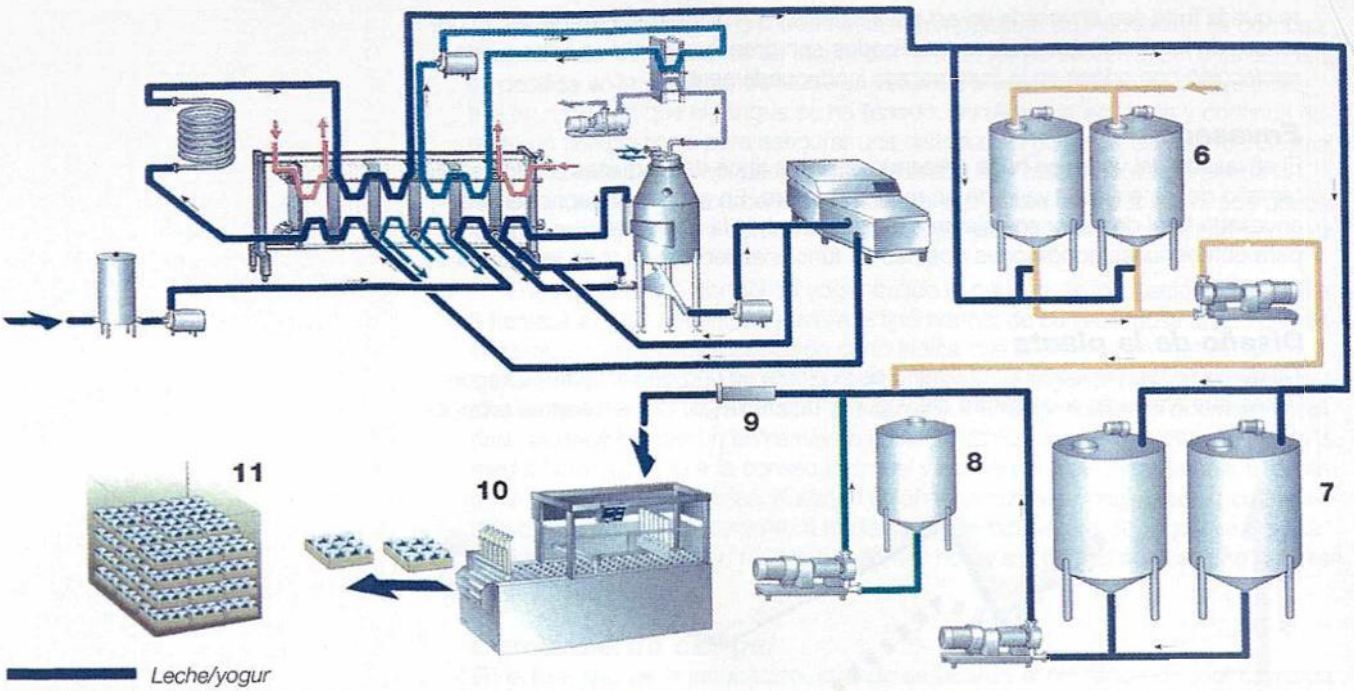
La curva A representa la situación ideal que se daría cuando se han optimizado todas las operaciones que influyen sobre la estructura y la viscosidad.

Es inevitable que el producto sea menos viscoso mientras se está tratando, ya que el yogur pertenece a una clase de productos con comportamiento al flujo de tipo tixotrópico, pero si todos los parámetros y equipos son totalmente optimizados la viscosidad se recuperará casi totalmente con lo que se minimizará la tendencia a la sinéresis.

La curva B muestra el resultado que se obtiene cuando el producto ha sido maltratado en el camino desde el tanque de incubación hasta el envasado y el almacenamiento refrigerado.

Yogur de tipo firme

Con el fin de reducir los costes de las instalaciones es posible utilizar la misma planta para producción tanto de yogur batido como de yogur firme. El pretratamiento de la leche destinada para ambos productos es idéntico hasta el enfriamiento a la temperatura de incubación. La Figura 11.17 muestra el diseño de línea de proceso para este tipo de producción. El cultivo se introduce en la corriente de leche conforme se bombea desde el tanque de almacenamiento intermedio hasta la llenadora.



El pretratamiento se muestra en detalle en la figura 11.9.

6. *Tanques de cultivo industrial*
7. *Tanques de regulación*
8. *Tanque de aroma*
9. *Mezclador*
10. *Envasado*
11. *Incubación*

Fig. 11.17 *Línea de producción de yogur firme.*

Aromatización/Envasado

La aromatización se puede realizar de forma continua introduciendo el aditivo correspondiente en la corriente de leche antes de la llenadora. Si se ha de añadir fruta o aditivos con partículas se ha de realizar la dosificación en los envases antes de llenarse con leche inoculada. Sin embargo, es importante recordar que los aditivos con bajo pH tienen una influencia negativa sobre la fermentación.

Un sistema alternativo de producción

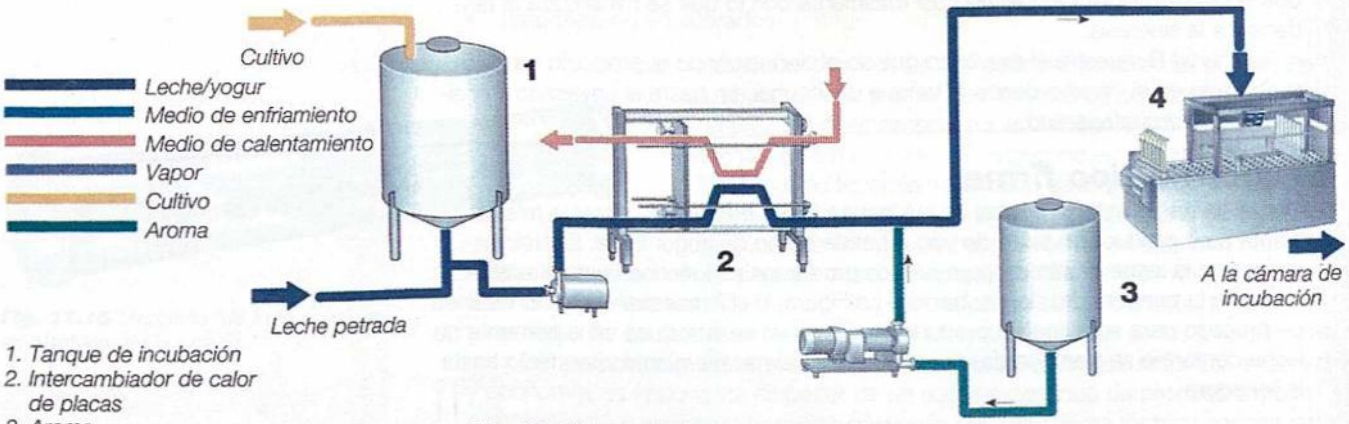
Otro sistema que se utiliza más frecuentemente para la producción de yogur firme se ilustra en la Figura 11.18. Este sistema ofrece flexibilidad en la organización de la producción ya que no es necesario tener una misma capacidad de pretratamiento y de envasado.

La leche, pretratada de la misma manera que para yogur batido, se enfría hasta una temperatura inferior a 10°C, preferiblemente hasta 5°C, y se bombea hasta uno, dos o más tanques (1). Después de la inoculación y agitación, la leche está lista para ser calentada en continuo (2) hasta la temperatura de incubación antes de ser envasada (4) en envases.

El cultivo industrial se puede añadir también en continuo antes del calentamiento hasta la temperatura de incubación.

Aromatización/envasado

El proceso anteriormente descrito de aromatización (3) y envasado es también aplicable al sistema alternativo.



1. *Tanque de incubación*
2. *Intercambiador de calor de placas*
3. *Aroma*
4. *Envasado*

Fig. 11.18 *Pasos finales en la producción de yogur firme. Este sistema proporciona una mayor flexibilidad en la organización de la producción.*

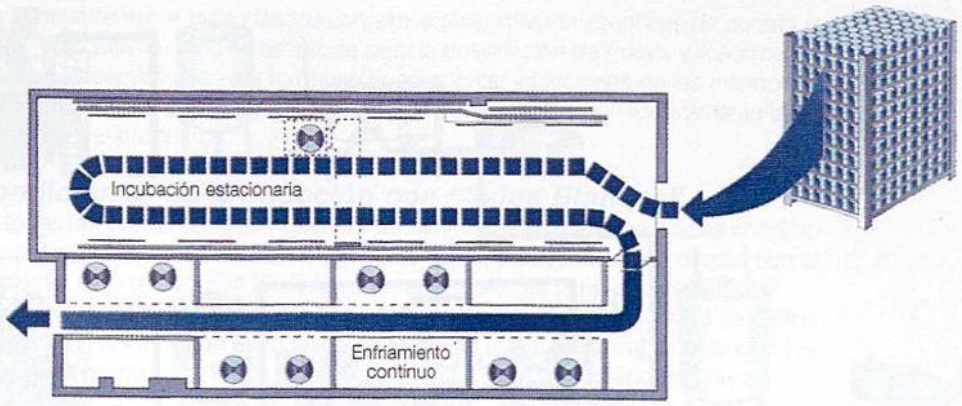


Fig. 11.19 *Cámara de incubación combinada con túnel de enfriamento.*

Incubación y enfriamiento

Después de llenos, los envases son dispuestos en bandejas, paletizados y llevados a uno de los dos sistemas siguientes para incubación y posterior enfriamiento:

- Cámara combinada de incubación/enfriamiento, donde los palés se dejan estacionarios en la cámara durante la incubación y enfriamiento. Después se llevan a la cámara de enfriamiento final.
- Sala de incubación capaz de cargar una gran cantidad de palés. Después de una adecuada incubación, los palés se llevan a un transportador que pasa a través de las secciones de enfriamiento comprendidas en un túnel. Este sistema consigue un enfriamiento "continuo", que se ilustra en la Figura 11.19.

Incubación

Los envases llenos se colocan en bandejas de diseño abierto y a una cierta distancia unos de otros para que el aire caliente y frío de la cámara de incubación y enfriamiento pueda llegar a cada envase individual. Las bandejas normalmente se apilan en palés, que se llevan a continuación a la cámara de incubación. Esto asegura una calidad uniforme, dado que se controla adecuadamente la temperatura.

Enfriamiento

Cuando se alcanza el pH óptimo (determinado empíricamente, y normalmente de 4.5), es el momento de empezar a enfriar. La temperatura a conseguir es normalmente de 18-20°C; es importante detener rápidamente el crecimiento posterior, lo que implica que se tiene que alcanzar una temperatura de 35°C en unos 30 minutos, y 18-20°C después de 30-40 minutos más.

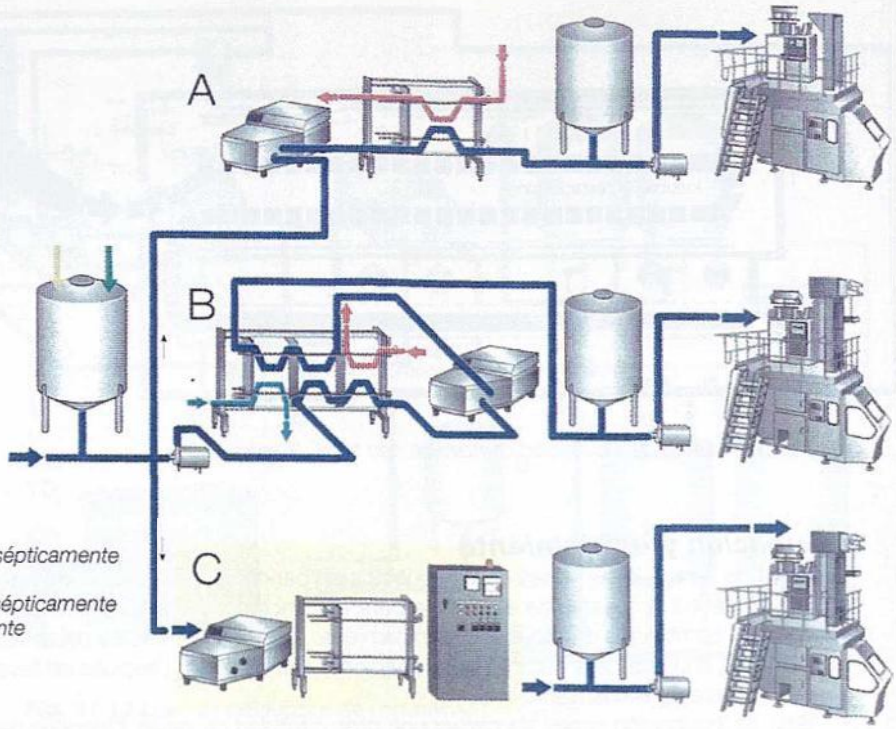
El enfriamientoi final, normalmente hasta menos de 5°C, tiene lugar en la cámara de almacenamiento refrigerado, donde se mantienen los productos en espera de la distribución.

La eficiencia de enfriamiento depende del tamaño del envase individual, el diseño y el material del envase, la profundidad de la pila de bandejas, el espacio entre los envases individuales en cada bandeja, y el diseño de las bandejas.

A una profundidad de un (1) metro, por ejemplo, la sección de paso libre de la pila para el flujo de aire debe ser no inferior al 25% del area total. Una sección de paso libre más pequeña requerirá mayores caudales de aire, lo que implicará mayores consumos energéticos.

Los palés (bandejas) están estacionarios durante la incubación. Se colocan en la cámara/sala de incubación de tal manera que se facilite el manejo FIFO (el primero que entra es el primero que sale, del inglés First In/ First Out). En un periodo de incubación típico de 3-3.5 horas, es muy importante que el producto no se exponga a ninguna agitación mecánica durante las últimas 2-2.5 horas, precisamente cuando es más sensible al riesgo de separación del lactosuero.

La capacidad de enfriamiento debe ser adecuada para conseguir el programa de temperaturas anteriormente citado. A modo de guía, se puede decir que el tiempo total de enfriamiento es de unos 65-70 minutos para pequeños envases (tamaños de 0.175-0.2 kg) y de unos 80-90 minutos para grandes envases (tamaño de 0.5 kg).



A. *Homogeneizado y enfriado*
Vida útil: 2-3 semanas, refrigerado
B. *Homogeneizado, pasteurizado, envasado aséptico*
Vida útil: 1-2 semanas, refrigerado
C. *Homogeneizado, tratado UHT, envasado aséptico*
Vida útil: varios meses a temperatura ambiente

Yogur
Medio de enfriamiento
Medio de calentamiento
Aroma
Estabilizante

Fig. 11.20 *Alternativas de proceso para el yogur líquido.*

Finalmente, independientemente del tipo de cámara de incubación/enfriamiento, el yogur firme se enfría hasta unos 5ºC en almacenamiento refrigerado.

Yogur líquido

En muchos países se ha hecho popular el yogur líquido, de baja viscosidad y también de bajo contenido en grasa. La Figura 11.20 muestra tres alternativas de proceso para yogur líquido.

El yogur destinado a la producción de yogur líquido se fabrica de forma ordinaria. Después de una agitación y un enfriamiento hasta 18-20ºC el yogur se transfiere a un tanque pulmón que es el principio de las alternativas de proceso de la Figura 11.20. El estabilizante y los aromatizantes se mezclan con el yogur en el tanque. La mezcla de yogur se puede tratar a continuación de diferentes maneras, dependiendo de la vida útil deseada para el producto.

Yogur de larga duración

Debido a la tendencia existente hacia unidades de producción mayores y más centralizadas, los mercados son cada vez más lejanos geográficamente y las distancias de transporte también. En algunos casos, las zonas de venta pueden ser tan extensas, que sólo se justifica desde el punto de vista económico una entrega por semana. Por otro lado, esto requiere métodos que aumenten la vida comercial del producto más allá de lo normal. En algunos países es difícil de mantener la integridad de la cadena del frío. Existe, además, una demanda de yogur esterilizado que pueda ser almacenado a temperatura ambiente.

La vida útil de los productos lácteos acidificados puede alargarse de dos formas:

- producción y llenado bajo condiciones asépticas;
- tratamiento térmico del producto acabado, sea inmediatamente antes de su llenado o cuando se encuentra en el envase.

Producción en condiciones asépticas

En la producción aséptica se toman las medidas necesarias para evitar que el yogur sea infectado por levaduras y mohos. Estos microorganismos destruirían el producto, ya que son capaces de sobrevivir y multiplicarse en medios ácidos, causando sabores anormales y separación de suero. La medida más importante es la limpieza completa y esterilización de todas las superficies en contacto con el producto. La característica especial de este tipo de producción aséptica es que tiene lugar bajo condiciones asépticas. Para ello se utilizan depósitos asépticos (que es-

tán constantemente presurizados con aire estéril), válvulas asépticas de control remoto, dispositivos también asépticos para la dosificación de frutas, y máquinas de envasado aséptico. De esta forma se pueden evitar infecciones de los microorganismos presentes en la atmósfera, por lo que se aumenta significativamente la vida comercial del producto.

Condiciones de producción con "Salas Blancas"

En todas las industrias alimentarias se deben mantener unas adecuadas condiciones asépticas, pero no sólo en los equipos que entran en contacto directo con el producto, sino también en los locales donde tiene lugar la producción.

Se puede instalar un sistema basado en la filtración de aire a través de "filtros absolutos", como el que se muestra en la Figura 11.21, para limpiar el aire en los locales de proceso, tanques, etc. para conseguir un nivel elevado de pureza.

Un sistema que serviría para cuatro tanques constaría de:

- un ventilador que suministraría unos 400 m^3/h de aire filtrado, del orden de 100 m^3/h por tanque,
- un "filtro absoluto" capaz de retener partículas mayores de 0.3 micras; lo que implica que retendría también los microorganismos, ya que los diámetros medios de los cocos, bacilos y hongos (levaduras y mohos) son 0.9, 0.25-10 y 3-15 micras respectivamente.
- un soporte para el filtro
- una conducción
- cuatro tuberías de conexión
- válvulas y manómetros

Cada sistema o tanque donde se vaya a inyectar aire irá equipado con una tubería de entrada extra para el aire y un sistema de seguridad para prevenir que el tanque sufra implosión como resultado de la formación de vacío por la caida de temperatura tras la limpieza.

La velocidad del aire es aproximadamente de 0.5 m/s y el tanque se presuriza positivamente hasta aproximadamente 5-10 m de columna de agua, que se corresponde con unos 0.05-0.1 bar.

El filtro normalmente se coloca en la sala de proceso, para que todas las partículas contaminantes del aire ambiente se eliminen y puedan lograrse las condiciones de "Sala Blanca".

Unos sistemas similares se utilizan en laboratorios bacteriológicos, salas de operaciones de hospitales e industrias farmacéuticas.

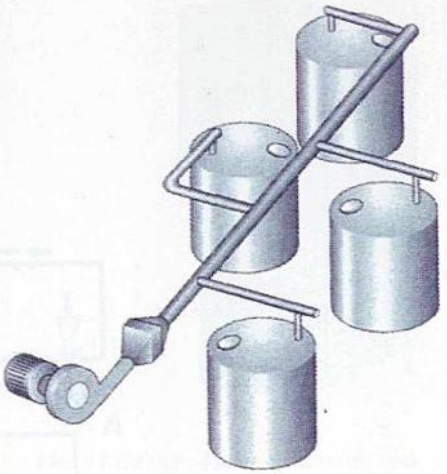


Fig. 11.21 *Sistema de filtración de aire para conseguir materializar el concepto de "Sala Blanca".*

Tratamiento térmico del yogur

El tratamiento térmico del yogur prolonga su vida útil por medio de:

- la inactivación de las bacterias del fermento y sus enzimas
- la inactivación de contaminantes tales como levaduras y mohos

En la producción de yogur batido, el gel obtenido en los depósitos de incubación se calienta hasta 72-75°C en un intercambiador de calor, con un tiempo de mantenimiento de unos pocos segundos, antes de proceder a su enfriamiento. El envasado del producto debe entonces realizarse en llenadoras asépticas para evitar reinfecciones.

El yogur de tipo firme puede calentarse a 72-75°C durante 5-10 minutos en sus envases, en de cámaras especiales de pasteurización. En ambos casos, antes de proceder al calentamiento se añade un estabilizador.

El calentamiento a 70-75°C mata todos los microorganismos patógenos presentes en el yogur.

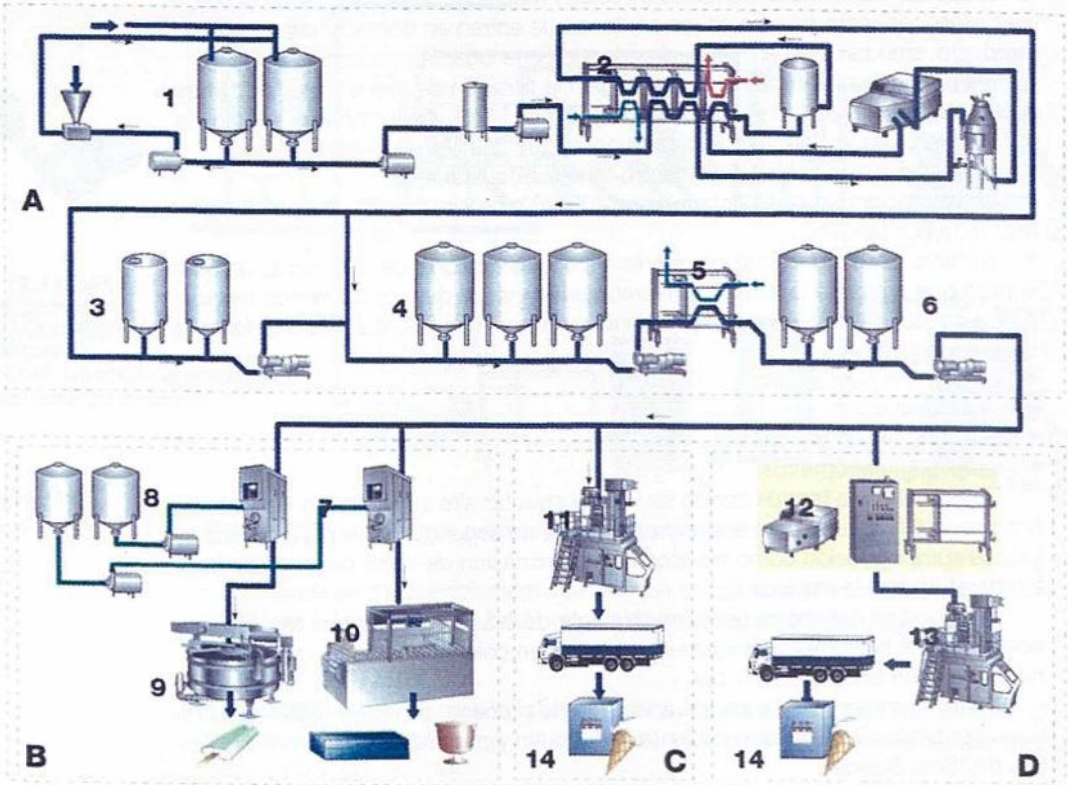
En muchos paises, el yogur se define como un producto en el que la flora microbiana se encuentra viva hasta el momento de su consumo. Esto significa que el tratamiento térmico del producto final estará prohibido. Por otra parte, en diversos paises está prohibida legalmente la utilización de estabilizantes o su uso se permite hasta un cierto límite.

Yogur congelado

El yogur congelado se puede fabricar de dos maneras. Una de las formas será mezclando el yogur con un mix de crema helada, y la otra consistirá en fermentar un mix de yogur, antes de su posterior procesado. El yogur congelado se puede presentar en tipos de congelados servidos blandos y tipos de congelados servidos

Ingredientes, %	Tipo blando	Tipo duro
Grasa	4	6
Azúcar	11 -14	12 - 15
SNG*	10 - 11	12
Estabilizante, emulsionante	0.85	0.85
Agua	71	66

SNG: sólidos no grasos



A. *Fabricación de yogur*
B. *Helado de crema endurecido*
C. *Mix de helado de crema blando*
D. *Mix de helado de crema blando de larga vida comercial*

1. *Tanques de mezcla*
2. *Pasteurizador*
3. *Tanques de cultivo industrial*
4. *Tanques de incubación*
5. *Enfriador*
6. *Tanques pulmón*
7. *Congelador de helado de crema*
8. *Tanques de aroma*
9. *Congelador de barras*
10. *Llenadora de conos/copas*
11. *Envasado*
12. *Tratamiento UHT*
13. *Envasado aséptico*
14. *Máquina de helado blando en el punto de venta al detalle*

Fig. 11.22 *Alternativas para la producción de yogur congelado.*

endurecidos. El mix que se utiliza para yogur servido blando difiere algo del que se utiliza para fabricar el tipo congelado endurecido. Las recetas típicas son:

Producción del mix de yogur

El mix, suplementado con el estabilizante y emulsionante deseado, se fabrica esencialmente de la misma manera que un yogur convencional.

En el diagrama de flujo de la Figura 11.22, en el bloque A, se muestra el proceso donde las materias primas mezcladas se desairean y homogenizan a 70ºC antes de ser pasteurizadas en un intercambiador de calor a 90ºC durante 5 minutos. Tras el enfriamiento regenerativo hasta 43ºC, la leche se transfiere hasta los tanques de incubación donde se ha añadido el cultivo industrial.

Se añade un 4-6% de cultivo, en la tubería, conforme se bombea la leche hasta los tanques de incubación. El tiempo de incubación del mix de yogur es apreciablemente más largo que el que tiene lugar en la producción de un yogur normal. Esto se debe a que el mix de yogur contiene muchos más carbohidratos que un yogur normal. Si se tiene un contenido de sacarosa de 10-12%, se requiere un tiempo de incubación de 7-8 horas para conseguir la acidez característica del yogur, que se presenta a pH 4.5.

Cuando se alcanza el pH requerido, el mix de yogur se enfría en un intercambiador de calor para detener una posterior fermentación. Se puede añadir azúcar y cualquier aromatizante por medio de una bomba dosificadora en un dispositivo de mezcla antes de que el yogur se transfiera a tanques de almacenamiento intermedio.

Desde los tanques intermedios, la producción se puede llevar a cabo a través de varios pasos alternativos, tal como se indica en los bloques B, C y D de la Figura 11.22.

B. El mix de yogur se transfiere directamente hasta el congelador de crema helada. Después se introduce en envases en forma de barras o copas/tarrinas, y continua el endurecimiento en congelador hasta conseguir la textura de yogur congelado endurecido.

C. El mix para yogur servido blando se envasa directamente en los envases, como los de la leche convencional o con el sistema bag-in-box. Estos se distribuyen entonces directamente hasta los puestos de venta de helados de crema blandos.

D. Para producir un mix de crema helada para la elaboración de yogur servido blando con una vida útil prolongada, el mix se puede esterilizar en una planta UHT antes de envasarse asépticamente.

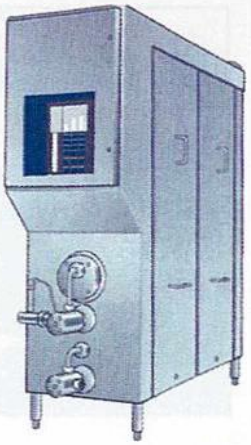


Fig. 11.23 *Congelador continuo de helados de crema*

Yogur congelado endurecido

Igual que en el caso de crema helada convencional, el yogur se precongela y se bate en un congelador continuo de crema helada (Figura 11.23). El batido tiene lugar en una atmósfera de nitrógeno para evitar los problemas de oxidación durante el posterior almacenamiento. El yogur congelado deja el congelador a -8°C, que es una temperatura algo más baja que la temperatura de una crema helada convencional. Esto le comunica una viscosidad óptima que es más adecuada para la mayoría de las máquinas llenadoras.

Se pueden añadir en el congelador aromatizantes líquidos a base de frutas o azúcar. Utilizando congeladores trabajando en paralelo se puede producir yogur congelado con diferentes aromas a partir de un mix de yogur común.

Tras la congelación, el yogur congelado se envasa en conos o copas o en envases familiares de la misma manera que los helados de crema convencionales. Los envases llenos se envían a continuación a un túnel de endurecimiento, donde se reduce la temperatura hasta -25°C.

Las barras de yogur congelado se pueden congelar de forma continua en un congelador de barras de helado de crema. Como el yogur se congela y se enfría directamente hasta -25°C, se puede llevar inmediatamente hasta las cámaras de conservación de congelados tras el envasado.

Distribución

El yogur congelado endurecido que es batido en atmósfera de nitrógeno se puede mantener en cámara de conservación de congelados durante 2-3 meses sin ningún efecto negativo sobre el sabor o la textura. La distribución requiere una adecuada cadena de frío continua hasta el momento de su consumo.

En el caso de un mix para yogur servido blando (no sometido a tratamiento UHT), se recomienda una temperatura máxima de almacenamiento de +6°C. Este mix tiene una vida de almacenamiento de un par de semanas. El yogur servido blando se consume inmediatamente tras la congelación.

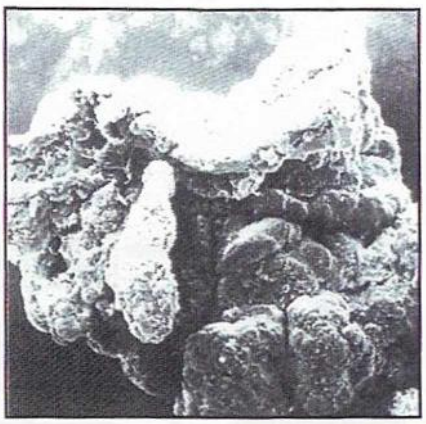


Fig. 11.24 *Grano de Kefir.*

Yogur concentrado

En el yogur concentrado el contenido de materia seca del producto se incrementa tras la fermentación. El lactosuero se separa del coágulo. Los principios de fabricación son idénticos a los de fabricación de la cuajada (ver capítulo 14). La única diferencia es el tipo de cultivo utilizado. El yogur concentrado es conocido bajo nombres tales como yogur tipo "colado" y Labneh.

Kefir

El kefir es uno de los productos lácteos acidificados más antiguos. Procede de la región del Cáucaso. La materia prima utilizada es leche procedente de cabras, ovejas o vacas. El kefir se produce en muchos paises, aunque las mayores cantidades (un total anual de unos 5 litros por habitante) se producen en Rusia.

El kefir debe ser viscoso, homogéneo y tener una superficie brillante. El sabor debe ser fresco y ácido, con un ligero aroma a levaduras. El pH del producto es normalmente de 4.3-4.4.

Para la producción de kefir se utiliza un cultivo especial, conocido como grano de kefir. Los granos constan de proteinas, polisacáridos y una mezcla de diversos tipos de microorganismos, tales como levaduras y bacterias formadoras de aromas y ácido láctico. Las levaduras representan alrededor del 5-10% de toda la microflora.

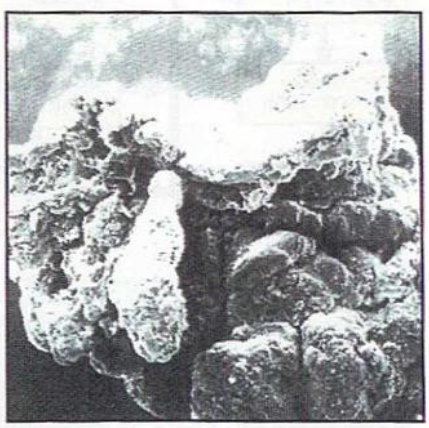


Fig. 11.25 *Los microorganismos en los productos acidificados a menudo viven en simbiosis con otros.*

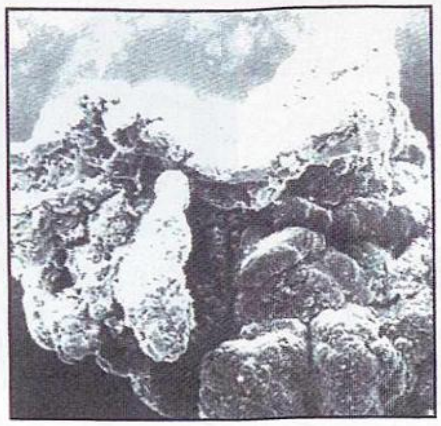


Fig. 11.26 *Levadura y ácido láctico en la superficie de un grano de kefir, vistas a través de un fotomicroscopio electrónico.*

Los granos de kefir son de un color amarillento y del tamaño de un guisante, de unos 15-20 mm de diámetro. Su forma es irregular, tal como se aprecia en la Figura 11.24. Son insolubles en agua y en la mayoría de los disolventes. Cuando se remojan en leche los granos se hinchan y su color pasa a ser blanco. Durante el proceso de fermentación, las bacterias producen ácido láctico, mientras que las levaduras producen alcohol y anhídrido carbónico a partir de la lactosa. Debido al metabolismo de las levaduras tiene lugar una cierta descomposición de las proteínas, de donde el kefir toma su especial aroma a levadura. El contenido de ácido láctico, alcohol y anhídrido carbónico se controla mediante la temperatura de incubación durante el proceso de producción.

A. Las bacterias del yogur Lactobacillus bulgaricus (en forma de bastón) y Streptococcus thermophilus (esférica) viven juntas.

B. Las levaduras y las bacterias del ácido láctico en la superficie del grano de kefir. La "bola" del centro es una levadura y los bastocitos son diferentes tipos de bacterias.

C. El centro de un grano de kefir. Las levaduras y las bacterias se unen por medio de una red que consta principalmente de proteinas y polisacáridos.

Dependiendo de las condiciones locales y de las necesidades, los equipos y las variables de proceso pueden diferir significativamente de un fabricante a otro.

Materias primas

De la misma manera que en otros productos lácteos acidificados, es importante disponer de materias primas de alta calidad. No debe contener ni antibióticos ni otros agentes bactericidas. La materia prima para la fabricación de kefir puede ser leche de cabras, ovejas o vacas.

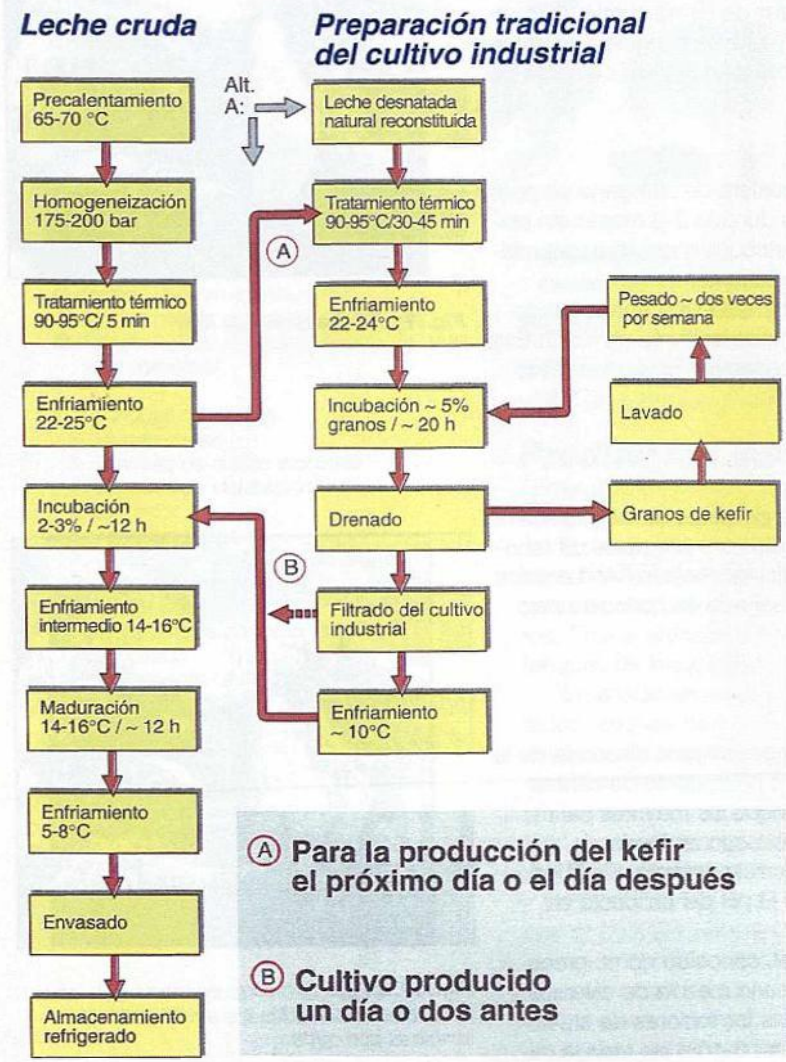


Fig. 11.27 *Diagrama de bloques típico de los distintos pasos del proceso de elaboración del kefir.*

Producción del cultivo iniciador

El cultivo para kefir se produce normalmente a partir de leche con distintos contenidos grasos, aunque se ha utilizado también la leche desnatada y la leche desnatada reconstituida para controlar mejor la composición microbiana de los granos de kefir.

Como en la propagación de cultivos iniciadores de otros productos lácteos acidificados, la leche como sustrato debe ser adecuadamente tratada térmicamente para inactivar los bacteriófagos.

La producción se realiza en dos etapas. Esto se hace así básicamente porque los granos de kefir son voluminosos y engorrosos de manejar. Los volumenes relativamente pequeños de cultivo madre son más faciles de controlar. La Figura 11.27 muestra las distintas etapas de proceso.

En la primera etapa, el sustrato (la leche) pretratado se inocula con granos de kefir activos. La incubación se realiza a unos 23°C y la proporción de granos utilizada es de aproximadamente un 5% (una parte de granos por cada 20 partes de sustrato) o 3.5% (una parte de granos por cada 30 partes de leche). El tiempo de incubación es de unas 20 horas. Como los granos tienden a irse al fondo, se recomienda una agitación intermitente durante 10-15 minutos cada 2-5 horas. Cuando se ha alcanzado el valor de pH deseado (4.5), se agita el cultivo antes de separar los granos del cultivo madre a través de un tamiz. El tamiz tiene unas aberturas de paso de un diámetro de 3-4 mm.

Entonces se procede a lavar los granos en el tamiz con agua hervida enfriada (a veces leche desnatada), antes de ser nuevamente utilizados en la incubación de otro cultivo madre. La población microbiana crece alrededor de un 10% por semana durante la incubación, por lo que los granos se han de pesar y el exceso de peso debe ser eliminado antes de utilizarse en un nuevo lote.

En la segunda etapa, el filtrado se puede enfriar hasta unos 10°C si tiene que almacenarse unas pocas horas antes de ser utilizado. Si se van a producir grandes can-

tidades de kefir, el filtrado puede ser inmediatamente inoculado en la leche pretratada que va a ser utilizada como sustrato del cultivo industrial. La dosis es el 3-5% del volumen del sustrato. Tras la incubación a 23ºC durante unas 20 horas, el cultivo industrial está listo para su inoculación en la leche de kefir.

Producción de kefir

Las etapas del proceso de producción de kefir son prácticamente las mismas que las que se llevan a cabo en la fabricación de la mayoría de los productos lácteos acidificados. La siguiente combinación es típica en la producción tradicional de kefir:

- Normalización de la grasa (no siempre practicada).
- Homogeneización.
- Pasteurización y enfriamiento hasta la temperatura de incubación.
- Inoculación con cultivo iniciador (aquí también denominado filtrado).
- Incubación en dos etapas (esto, junto con el cultivo específico, es característico del kefir).
- Enfriamiento.
- Envasado.

Normalización de la grasa

Según la biliografía, el contenido de grasa del kefir varía entre 0.5% y 6%. La leche cruda se utiliza a menudo con su contenido inicial de grasa. Sin embargo, frecuentemente se establecen unos contenidos de grasa de 2.5 a 3.5%.

Homogeneización

Después de la normalización de grasa, en su caso, la leche se homogeneiza a unos 65-70ºC y 17.5-20 MPa (175-200 bar).

Tratamiento térmico

El programa de tratamiento térmico es el mismo que para yogur y la mayoría de los productos lácteos acidificados: 90-95ºC durante 5 minutos.

Inoculación

Después del tratamiento térmico, la leche se enfría hasta la temperatura de inoculación, normalmente alrededor de 23ºC, tras lo cual se añade un 2-3% de cultivo iniciador.

Incubación

El período de incubación normalmente se divide en dos etapas, acidificación y maduración.

Etapa de acidificación

La etapa de acidificación se prolonga hasta que se alcanza un valor de pH de 4.5, o expresado en acidez, hasta que se alcanzan 85-100ºTh (35-40ºSH). Este proceso dura unas 12 horas. El coágulo se agita a continuación y se preenfría mientras permanece en el tanque. El enfriamiento y la agitación se detienen a una temperatura de 14-16ºC.

Etapa de maduración

El sabor típico ligeramente "a levaduras" comienza a desarrollarse durante las siguientes 12-14 horas. El enfriamiento final comienza cuando la acidez ha alcanzado 110-120ºTh (pH de 4.4).

Enfriamiento

El producto se enfría rapidamente hasta 5-8ºC en un intercambiador de calor. Esto detiene cualquier reducción posterior de pH. Es de importancia vital que el producto se trate cuidadosamente cuando se enfría y durante el posterior envasado. Es por ello necesario minimizar la agitación mecánica que se produce en bombas, tuberías y máquinas llenadoras. Se debe también evitar la incorporación de aire, ya que éste aumenta el riesgo de sinéresis en el producto.

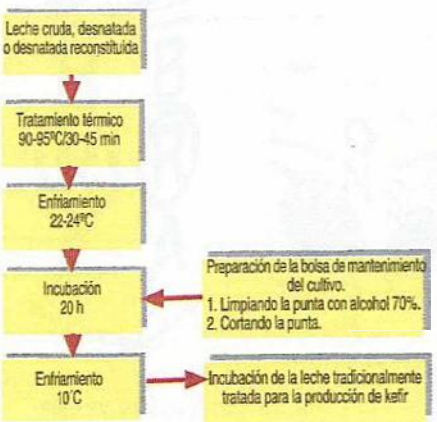


Fig. 11.28 *Preparación de cultivo industrial para kefir con cultivo liofilizado.*

Otra manera de producir kefir

Tal como se ha indicado anteriormente, el método tradicional de preparar cultivo industrial para la fabricación de yogur es laboriosa. Esto, en combinación con la

complejidad de la microflora, a veces lleva a obtener variaciones inaceptables de calidad en el producto.

Para superar estos problemas un equipo del Laboratorio de Investigación de SMR (de Lund, en Malmö, Suecia) ha desarrollado un cultivo concentrado liofilizado que se maneja de la misma manera como las formas similares de otros cultivos. Este tipo de cultivo se ha comenzado a utilizar en la práctica desde 1985, obteniéndose así unos productos con una calidad más uniforme que los fabricados a partir del método convencional.

Tras un adecuado examen de los granos de kefir obtenidos de distintas fuentes, las cepas de levaduras y bacterias fueron aisladas y probadas según distintas características de crecimiento, producción de ácido láctico, formación de aroma, etc. A continuación se estableció la composición del cultivo liofilizado para obtener un equilibrio de microorganismos en el cultivo industrial y producto comparable al del kefir tradicional fabricado con granos en un cultivo madre.

Actualmente se dispone comercialmente de fermentos de kefir concentrados liofilizados para su uso directo en la leche para la elaboración de kefir. El diagrama de bloques de la Figura 11.28 ilustra las etapas de proceso.

Comparado con la producción de cultivo industrial tradicional, la técnica basada en el uso de fermentos liofilizados reduce el número de etapas de proceso, y de esta manera el riesgo de reinfección del cultivo.

Nata acidificada

La nata acidificada se ha empleado durante muchos años en algunos países. Es la base para la preparación de muchos platos, de la misma forma que el yogur. La nata acidificada puede tener un contenido en grasa del 10-12% o del 20-30%. Los cultivos utilizados para su acidificación contienen *Str. lactis* y *Str. cremoris*, asi como *Str. diacetilactis* (cultivos D y DL) y *Leuc. citrovorum* (cultivos DL y L). Estas últimas bacterias se utilizan para formación de aromas.

La nata acidificada tiene un color brillante, una estructura uniforme y es relativamente viscosa. El sabor debe ser suave y ligeramente ácido. Como otros productos fermentados, la nata acidificada tiene una vida comercial limitada. Para conseguir un producto de alta calidad se debe aplicar la más estricta higiene en su proceso de producción.

La nata ácida es brillante, tiene una estructura uniforme y es relativamente viscosa. El gusto debe ser dulce y ligeramente ácido.

En los envases que no sean estancos al aire se pueden desarrollar mohos y levaduras. Estos microorganismos crecen principalmente sobre la superficie de la nata acidificada. En el caso de un almacenamiento prolongado, las enzimas de las bacterias acidolácticas, que descomponen la β-lactoglobulina, se activarán y la nata acidificada se volverá amarga. Por otra parte, al difundirse el anhídrido carbónico y otras sustancias aromáticas a través de las paredes de los envases, la nata acidificada pierde su sabor.

Producción

La linea de proceso para la producción de nata acidificada incluye equipos para la normalización del contenido graso, homogeneización y tratamiento térmico de la nata, así como para su inoculacion y envasado.

Homogeneización

Antes de su inoculación, la nata se homogeneiza. Para una nata con el 10-12% de grasa la presión normal de homogeneización es de 15-20 MPa (150-200 bar), a una temperatura de 60-70°C. Hasta cierto punto, un incremento en la temperatura de homogeneización puede mejorar la consistencia.

Para natas con un 20-30% de grasa la presión de homogeneización debe ser más baja, de 10-12 Mpa (100-120 bar), ya que no se tiene suficiente proteina (caseina) para formar membranas sobre la superficie ampliada total.

Tratamiento térmico

La nata homogeneizada se suele calentar durante 5 minutos a 90°C. Se pueden utilizar otras combinaciones tiempo/temperatura si la técnica de homogeneización es cuidadosamente combinada con el tratamiento térmico.

Inoculación y envasado

La nata pretratada se enfría hasta una temperatura de inoculación de 18-21°C. Entonces se añade cultivo industrial en una proporción del 1-2%.

La inoculación se puede llevar a cabo en el depósito o en los envases. El tiempo de fermentación es de 18-20 horas. Cuando se termina la fermentación, la nata acidificada se enfría rápidamente con objeto de evitar posteriores caídas del pH. La viscosidad de la nata fermentada puede ser muy alta, lo que dificultaría su envasado. A pesar de las medidas tomadas, los tratamientos mecánicos a los que se somete la nata acidificada (agitación, bombeo y envasado) provocan un cierto deterioro de la consistencia del producto, volviéndose menos viscosa.

Para evitar tratamientos mecánicos, algunos fabricantes realizan la inoculación de la nata, su envasado y su fermentación cuando ésta se encuentra en el envase. Después de la adición del cultivo y del posterior llenado, el producto se almacena a 20ºC hasta que la acidez de la fase libre de grasa es de unos 85ºTh, que necesita unas 16-18 horas. Entonces, se procede a transportar los envases de forma cuidadosa hasta la cámara de refrigeración, donde permanecen por lo menos 24 horas a una temperatura de unos 6ºC antes de su distribución.

La nata acidificada se utiliza a menudo en el cocinado de distintos productos.

La mazada

La mazada es un subproducto obtenido en la producción de mantequilla a partir de nata dulce o acidificada.

El contenido en grasa es aproximadamente del 0.5%, teniendo la mazada un porcentaje relativamente alto de material membranar, incluyendo la lecitina. Su vida comercial es corta, ya que el sabor de la mazada cambia rápidamente debido a la oxidación del contenido de material membranar. En la mazada de nata acidificada se produce con frecuencia la separación del suero, por lo que aparecen defectos difíciles de evitar.

Mazada fermentada

La mazada fermentada se fabrica en muchos lugares con objeto de superar problemas tales como la aparición de olores desagradables y su corto período de vida comercial. La materia prima utilizada puede ser mazada sin acidificar, procedente de la producción de mantequilla a base de nata no fermentada, leche desnatada o leche con bajo contenido graso.

En todos los casos, la materia prima se calienta a 90-95ºC durante unos 5 minutos antes de ser enfriada hasta la temperatura de inoculación. Normalmente, se utilizan bacterias acidolácticas. En algunos casos, cuando la materia prima es leche desnatada o de bajo contenido graso, se añaden granos de mantequilla al producto con objeto de hacerlo más parecido a la mazada.

Recientes desarrollos en productos lácteos acidificados

"Las bacterias acidolácticas - ¿vacunas del futuro?"

El título anterior apareció en el Scandinavian Journal of Nutrition/Näringsforskning (Vol 37: 132-137, de 1993) encabezando un breve reportaje realizado por Clas Lönner sobre una conferencia realizada en Lund, Suecia, el 29 de abril de 1993.

Durante varios años se ha sabido, al menos en la parte norte de Suecia, que un cierto tipo de leche acidificada denominaca Langfil había sido utilizada para curar heridas y tratar infecciones fúngicas vaginales. No obstante, los estudios sobre las bacterias acidolácticas y su importancia para la salud se pueden encontrar a comienzos del siglo XX. Elie Metchnikoff, profesor del Instituto Pasteur de Paris, Francia, encontró que mucha gente de su Rusia natal consumía mucho yogur y vivía mucho tiempo. (Al profesor Metchnikoff le fue concedido el Premio Nobel de medicina en 1908, aunque fue por el descubrimiento de la fagocitosis, el fenómeno por el cual las bacterias que han invadido el cuerpo se "comen" los corpúsculos blancos de la sangre, los leucocitos).

Metchnikoff mantenía que los lactobacilos ingeridos mediante el consumo de yogur pasaban a través del estómago y destruían las bacterias de la putrefacción en el colon. De esta manera inhibirían la producción de productos de desecho "tóxicos" que causarían alteraciones crónicas perjudiciales en el sistema, especialmente arterioesclerosis.

Esta teoría de Metchnikoff era plausible, aunque ha sido criticada en base a que los lactobacilos no pueden sobrevivir a pH bajo, aproximadamente de 2, que

Fig. 11.29 *Los productos BRA y Onaka son ejemplos de productos lácteos que utilizan nuevas combinaciones de bacterias para conseguir efectos positivos en la función intestinal.*

es el que prevalece en el estómago. Además de lo anterior, los siguientes fragmentos de información reflejan la situación en la década final del siglo XX.

El interés en el uso deliberado de bacterias acidolácticas como constituyente saludable de ciertos alimentos y piensos ha ganado fuerza en los últimos años. Los más entusiastas afirman que las bacterias acidolácticas vivas serán la respuesta del siglo XXI a las penicilinas y otros medicamentos del siglo XX.

La expresión "alimento funcional" se aplica a los alimentos con propiedades casi medicinales que mejoran la salud. "Alimentos de uso especialmente saludable" es otra terminología para denominar lo mismo. Japón es hasta el momento el país líder en "alimentos funcionales" y tiene un gran programa preventivo de actuaciones para reducir al máximo los costes en tratamientos médicos.

Las bacterias acidolácticas se han utilizado desde tiempos inmemoriales en alimentos fermentados.

Las cepas especiales de bacterias normalmente utilizadas en la producción de yogur, así como otros tipos tales como *Lactobacillus (L.) acidophilus, L. reuteri* (un relativamente recien llegado), Bifido-bacterias y ciertas especies de *Lactococcus lactis*, están entre aquellos que han sido encontrados de interés en la producción de alimentos funcionales.

¿Qué propiedades debe tener una bacteria acidoláctica para ser capaz de funcionar en el intestino? Las cuatro características siguientes que son de gran importancia:

- Habilidad de colonizar y sobrevivir.
- Capacidad adhesiva.
- Habilidad de agregarse.
- Efectos antagonistas.

Los microorganismos *L. acidophilus* y *Bifido-bacterias* son miembros importantes de la flora intestinal humana.

Las bacterias *L. acidophilus* y Bifido-bacterias son miembros importantes de la flora intestinal humana. Los primeros normalmente predominan en el intestino delgado y los últimos en el intestino grueso.

La producción de estas importantes bacterias está disminuida en algunas personas como resultado de una determinada medicación, stress o edad avanzada. En mucha gente, la producción reducida de bacterias intestinales puede causar síntomas tales como hinchazón, indigestión y fuertes síntomas de enfermedad.

El consumo de bacterias vivas de *L. acidophilus* y Bifido-bacterias en productos lácteos es una manera ideal de restaurar el equilibrio de la flora intestinal. Además de la posible prevención y corrección de la diarrea, la bibliografía indica que los *L. acidophilus* y Bifido-bacterias pueden ayudar a:

- reducir el nivel de colesterol en la sangre
- aliviar la mala absorción de la lactosa (intolerancia a la lactosa)
- fortalecer el sistema inmunológico
- reducir el riesgo de cáncer de estómago.

(Ref.: "Nu-trish cultures", Chr. Hansen's Laboratories, Copenhage, Dinamarca).

Estos microorganismos se pueden utilizar sólos o en combinación con otros cultivos, por ejemplo cultivos termófilos, del yogur o cultivos mesófilos. Un producto llamado leche BRA, por ejemplo, era recientemente introducido en el mercado sueco. El nombre tenía un doble sentido: "BRA" es la palabra sueca que significa bueno, y también se correponde con las iniciales de las bacterias Bifido, Reuteri y Acidophilus. Este producto está disponible en dos versiones: dulce y ácido.

Las bacterias acidolácticas pueden tener, por lo tanto, un gran potencial en la promoción de la salud tanto de los seres humanos como de los animales. Los efectos anunciados, sin embargo, no están totalmente documentados. Por lo tanto es importante que se invierta suficiente cantidad de recursos en este campo en un futuro próximo, tanto para encontrar nuevos e interesantes efectos sobre la salud de las bacterias acidolácticas, como para conseguir más información científica.

La siguiente bibliografía se da para quien esté interesado en saber más acerca de este tema:

1. Microbial surface hydrophobicity, R J Doyle and M Rosenberg. Amer Soc for Microbiology, Washington 1990. ISBN 1-5581-028-4.

2. The Lactic Acid Bacteria in health and disease, Volume 1, B J B Wood, Elsevier Applied Science, London 1992. ISBN 1851667202.

3. Probiotics, the scientific basis, R Fuller. Chapman & Hall, London 1992. ISBN 0-412-40850-3.

4. Nutrition and the intestinal flora. Almqvist & Wiksell 1983, pp 141.

Capítulo 12

Mantequilla y productos lácteos para untar

La International Dairy Federation, IDF, (Federación Internacional de Lechería) ha introducido una norma relativa a mantequillas y productos para untar, es la IDF Standard 166:1993, "Recomendaciones para Productos Grasos para Untar". Estas recomendaciones tienen el objetivo de establecer un amplio marco que permita el desarrollo de un grupo de normas más específico o individualizado de acuerdo con los requerimientos de cada pais.

Definiciones

Producto graso para untar: Un "producto graso para untar" es un alimento en forma de emulsión, que es principalmente del tipo agua-en-aceite, y que comprende principalmente una fase acuosa y grasas y aceites comestibles.

Grasas y aceites comestibles: Son alimentos compuestos principalmente de triglicéridos de ácidos grasos. Son de origen vegetal, animal, lácteo o marino.

Las siguientes tablas (12.1 y 12.2) son excepciones a esta norma.

Tabla 12.1

Composición esencial de los productos a base de grasa láctea y margarina

Productos de grasa láctea	Productos de grasa mezclada	Productos a base de margarina
Grasa láctea 100% de la grasa total	Grasa láctea mín. 15% max. 80% de la grasa total	Grasa láctea máx. 3% de la grasa total

Nota: Se puede imponer una zona (o zonas) restringida con respecto al contenido graso y a la proporción de grasa láctea y otros tipos de grasas de acuerdo con la legislación nacional u otra legislación relevante.

Las materias primas principales deben ser agua y/o productos lácteos, grasas comestibles y/o aceites, o mezclas de éstos. En cuanto al contenido graso, la norma establece que los productos grasos para untar se han de clasificar en tres grupos de acuerdo con el origen de la grasa. El máximo contenido de grasa debe ser del 95%.

El nombre del alimento se corresponderá con lo especificado en la normativa nacional. Los productos, sin embargo, deben cumplir con los requerimientos generales que se indican en la Tabla 12.2, que se han establecido para ser aplicados a los productos de los tres grupos.

Tabla 12.2

Nombres de los productos a base de grasa láctea y margarina.

Contenido de grasa %	Productos de grasa láctea	Productos de grasa mezclada	Productos a a base de margarina
80 - 95	Mantequilla*	Mezcla	Margarina*
>62 - <80	Lácteos de untar	Mezcla de untar	Grasa de untar
60 - 62	3/4 grasa o mantequilla con poca grasa	3/4 grasa o mezcla con poca grasa	3/4 grasa o margarina con poca grasa
>41 - <60	Productos lácteos para untar con poca grasa	Mezcla para untar con poca grasa	Producto para untar con poca grasa
39 - 41	1/2 o mantequilla con contenido bajo en grasa	1/2 o mezcla con bajo contenido graso	1/2 o margarina con con bajo contenido graso o Minarina*
<39	Productos lácteos con bajo contenido graso	Mezclas para untar con bajo contenido graso	Productos para untar con bajo contenido graso

* Los siguientes estándares individuales FAO/OMS normalmente se aplican a los productos en el comercio internacional y se indican las designaciones permitidas:

A1 – Standard para la Mantequilla y Mantequilla de Suero.

(A16 - Standard para Productos Lácteos para untar con bajo contenido graso - borrador)

Codex Standard 32-1981 para Margarina

Codex Standard 13-1981 para Minarina

La Tabla 12.3, que lista los nombres, las designaciones aprobadas y las composiciones de algunos productos grasos comerciales en Suecia puede servir como ejemplo.

Durante muchos años se han tenido sólo unos pocos tipos reconocidos de grasas para cocinar, como mantequilla, margarina, manteca de cerdo y aceite de coco.

La mantequilla y la margarina son los dos productos que más interés han acaparado. Ambos productos se han utilizado para untar el pan así como para cocinar

Tabla 12.3
Ejemplos de productos grasos (Suecia)

Producto composición	**Mantequilla**	**Margarina**	**Producto lácteo para untar Bregott (Margarina)**	**Producto lácteo para untar poco graso Lätt & Lagom (Minarina)**	**M-cocos**	**Manteca**
Material básico	Nata ácida	Aceites y grasa vegetales	Nata ácida y aceite vegetal	GLA* + conc. de mantequilla leche pref.	Aceite de coco	Manteca
Grasa, %	80	80	80	40	100	100
Humedad, %	16 - 18**	≈18	17 -18**	48	0	0
Sal, %	0 - 2	1.5 - 2.0	1.4 - 2.0	1.2	0	0
Proteinas, %	0.7	0.2 - 0.4	0.6	7.5	0	0
Energía específica KJ/100 g	3 140	3 100 - 3 150	3 140	1 710	3 900	3 900
Vitaminas	A 2 500	A 3 000	A 3 000	A 3 000	0	0
I.U./100 g	D 55	D 300	D 300	D 300	0	0
Mantenimiento de la calidad a 6-7°C	2 - 3 meses	3 meses	2 -3 meses	1.5 meses	6 -12 meses	6 meses
Usos	Mesa Cocina	Mesa Cocina	Mesa Cocina	Mesa	Cocina Dulces	Frituras Pastelería

* GLA = Grasa Láctea Anhidra
** Varía con el contenido de sal
Tabla de Livsmedelsbranscens Utbildningsorgan, Brevskolan, Suecia

y en pastelería. Estos dos productos presentan la desventaja de que cuando se producen tradicionalmente, no se extienden con facilidad a temperatura normal de refrigeración (+5°C). Esto llevó al desarrollo durante los años 60 y 70 de una variedad de productos que se extienden más facilmente, incluyendo las mezclas con bajo contenido graso (40%), también denominados *minarinas*, y los productos más recientes de contenido graso reducido (60%) denominados *mellarinas*.

Mantequilla

Normalmente, la mantequilla se divide en dos categorías principales:

- mantequilla de nata dulce;
- mantequilla de nata ácida o fermentada, obtenida a partir de una nata que ha sido acidificada por crecimiento bacteriano.

La mantequilla también puede ser clasificada de acuerdo con su contenido en sal: sin salar, salada y extrasalada.

A mediados del siglo XIX todavía se hacía la mantequilla a partir de nata acidificada de forma natural. La nata separada en la superficie de la leche se pasaba entonces a vasijas de madera. El proceso de elaboración se llevaba a cabo de forma manual en mantequeras. El proceso de acidificación natural es muy sensible a las infecciones por microorganismos extraños, que a veces estropeaban el proceso.

Conforme aumentaron los conocimientos sobre los sistemas de enfriamiento fue posible separar la nata antes de que se acidificase, y hacer mantequilla a partir de nata dulce. Gradualmente, se fueron mejorando los métodos de elaboración de mantequilla, con lo cual aumentó la calidad del producto y su rendimiento económico. Finalmente, se descubrió que la nata dulce podía ser acidificada por la adición de leche de acidificación natural o por mantequilla ácida. Fue entonces posible conseguir nata madurada bajo condiciones más controladas.

La invención de la separadora centrifuga en 1878 supuso un nuevo paso adelante, ya que fue posible separar la nata de la leche de forma rápida y eficiente. Fue también el comienzo de la producción de mantequilla a gran escala. Otras contribuciones importantes a la calidad del producto y a la economía del proceso fueron la introducción de la pasteurización en los años 1880, la utilización de cultivos puros

bacterianos en los años 1890 y la introducción de las máquinas mantequeras al comienzo del siglo XX.

La producción actual de mantequilla es el resultado del conocimiento y de la experiencia ganada durante años en materias tales como la higiene, la acidificación bacteriana y el tratamiento térmico. También ha sido fundamental el rápido desarrollo tecnológico que ha dado origen a máquinas muy avanzadas.

Mantequilla dulce y mantequilla ácida

Las variaciones de composición en la mantequilla se deben a diferencias en las condiciones de producción.

Tal como se ha visto en la Tabla 12.3, la mantequilla contiene un 80% de grasa y un 16-18% de agua, dependiendo básicamente de si es salada o no. La mantequilla también contiene las vitaminas A y D.

El color de la mantequilla varía según el contenido de carotenoides, que suponen desde el 11 hasta el 50% del total de la vitamina A de la leche. Como el contenido de carotenoides de la leche normalmente varía entre el invierno y el verano, la mantequilla producida en invierno tiene un color más claro. (En este contexto se debe mencionar que la mantequilla hecha de nata de leche de búfala es blanca, ya que la leche de búfala no contiene carotenoides). La mantequilla debe ser también densa y de sabor fresco.El contenido en agua debe estar disperso en forma de finas gotas, de tal manera que la grasa aparezca como un producto seco. La consistencia debe ser suave, de tal manera que se pueda extender fácilmente y fundir rápidamente en la boca.

La mantequilla de nata ácida debe oler a diacetilo, mientras que la mantequilla dulce debe saber a nata. Un ligero sabor a cocido es aceptable en el caso de la mantequilla dulce.

La mantequilla hecha a partir de nata acidificada tiene ciertas ventajas sobre la dulce. El aroma es más rico, el rendimiento en mantequilla es más alto y hay un menor riesgo de infecciones después del tratamiento térmico, ya que el cultivo bacteriano predomina sobre el desarrollo de microorganismos indeseables.

Por otra parte, la mantequilla ácida también tiene sus inconvenientes. Por un lado da lugar a una mazada también acidificada. La mazada procedente de la mantequilla ácida tiene un pH más bajo que la mazada procedente de mantequilla dulce, lo que provoca a veces que sea más difícil de tratar que la mazada de mantequilla dulce. Otra desventaja de la mantequilla ácida es que resulta más sensible a los defectos de oxidación, que dan lugar a sabores metálicos. Esta tendencia se ve acentuada si se encuentran presentes trazas muy pequeñas de cobre u otros metales pesados, lo que reduce considerablemente las posibilidades de mantener las propiedades químicas de la mantequilla.

Fig. 12.1 *Mantequera manual tradicional, inicialmente utilizada para la fabricación doméstica de mantequilla.*

Producción de mantequilla

La mantequilla se elaboraba inicialmente en la granja para autoconsumo. Entonces se utilizaba una mantequera manual, como la que se muestra en la Figura 12.1. Después del trabajo de la nata en la mantequera y de la descarga de la mazada, los granos de mantequilla se recogían en una artesa poco profunda y se trabajaba manualmente hasta conseguir un nivel aceptable de sequedad y textura.

Los procesos de producción de mantequilla a gran escala generalmente constan de un buen número de etapas. La Figura 12.2 muestra de forma esquemática los sistemas discontinuos de producción en bombos y los sistemas continuos de producción en máquinas mantequeras. El bombo tradicional se utiliza todavía, pero está siendo rápidamente reemplazado por las máquinas mantequeras continuas.

La mantequilla se puede producir en mantequeras según proceso discontinuo por cargas o según un proceso continuo con modernas máquinas mantequeras.

La nata puede ser suministrada por una industria de tratamiento de leche (el exceso de nata), o bien puede ser separada de la leche entera en la propia mantequería. En el primer caso, la nata debe haber sido pasteurizada por el suministrador. El almacenamiento y la posterior entrega a la industria mantequera se debe realizar de forma que se eviten reinfecciones, aireación o formación de espuma. Después de la recepción, pesado y análisis, la nata se almacena en depósitos.

Si la nata es separada en la propia industria fabricante de mantequilla, la leche entera se precalienta hasta 63ºC en el pasteurizador antes de proceder a su separación. La nata caliente se envía hasta un depósito de almacenamiento intermedio antes de ser bombeada hasta la planta de pasteurización de nata. Para conseguir un tratamiento suave de la nata es interesante ver la descripción del método Scania en el capítulo 8.

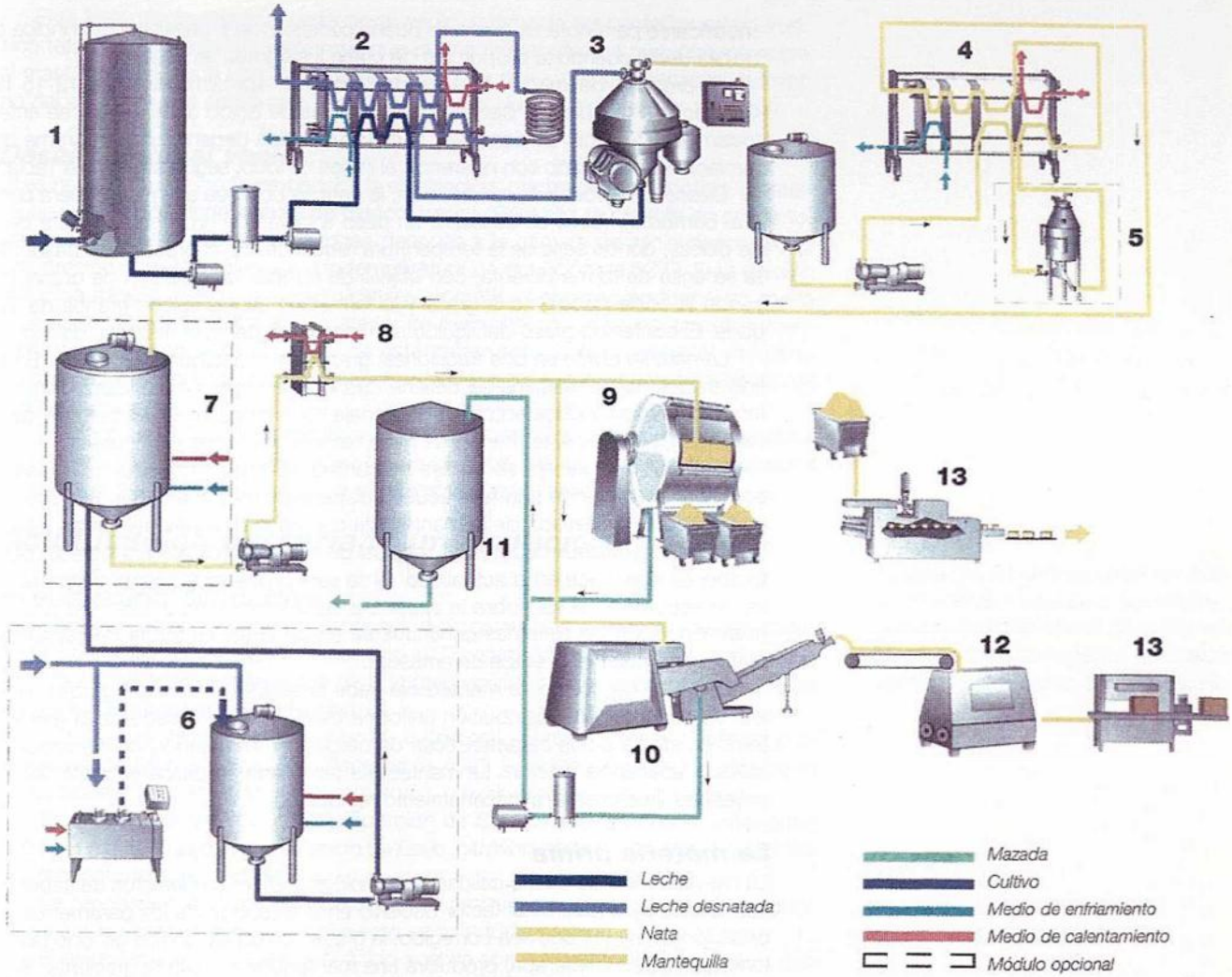


Fig. 12.2 *Diagrama esquemático general de los pasos del proceso discontinuo por cargas o según un proceso continuo con modernas máquinas mantequeras.*

1. *Recepción de leche*
2. *Precalentamiento y pasteurización de leche desnatada*
3. *Separación de la grasa*
4. *Pasteurización de la nata*
5. *Desaireación a vacío, en su caso*
6. *Preparación del cultivo, en su caso*
7. *Maduración y acidificación de la nata, en su caso*
8. *Tratamiento de temperatura*
9. *Batido y amasado, en discontínuo*
10. *Batido y amasado, en continuo*
11. *Recogida de la mazada*
12. *Silo de mantequilla con transportador*
13. *Máquinas envasadoras*

La leche desnatada procedente de la separadora centrífuga se pasteuriza y enfría antes de ser bombeada a sus depósitos de almacenamiento. Cuando se va a producir mantequilla ácida, parte de la leche desnatada se debe utilizar en la preparación del fermento.

Desde los depósitos intermedios de almacenamiento, la nata pasa a ser pasteurizada a una temperatura de 95°C o más. La alta temperatura es necesaria para destruir las enzimas y los microorganismos que podrían dañar la calidad de la mantequilla.

La destrucción de los microorganismos indeseables es también beneficiosa en el caso de la mantequilla ácida, ya que con ello se crean unas condiciones perfectas para el crecimiento del cultivo bacteriano. El tratamiento térmico produce compuestos sulfhidrilo fuertemente antioxigénicos, que reducen el riesgo posterior de oxidación.

Se puede incluir una etapa de desaireación a vacío en la línea si la mantequilla tuviese un aroma desagradable (por ejemplo, sabor a cebolla). Las sustancias aromáticas se encuentran ligadas a la grasa, por lo que son transmitidas a la mantequilla si no se las elimina previamente. El tratamiento por vacío antes de la pasteurización implica un precalentamiento de la nata hasta la temperatura requerida y un posterior enfriamiento flash (flash-cooling) con objeto de liberar los gases y sustancias volátiles presentes en la misma. Después, la nata vuelve al pasteurizador para un tratamiento posterior (calentamiento, mantenimiento y enfriamiento), antes de pasar al depósito de maduración.

En el depósito de maduración, con un volumen máximo recomendado de 30.000 l, la nata se somete a un programa de temperaturas, que dará a la grasa la estructura cristalina requerida cuando se produce su solidificación durante el enfriamiento. El programa se selecciona para compaginar factores tales como la composición de la grasa láctea, expresada, por ejemplo, mediante el índice de iodo, que es una medida del contenido de grasas insaturadas. El tratamiento también puede

La desaireación a vacío se recomienda cuando la nata tiene un fuerte defecto de aroma y sabor, por ejemplo gusto a cebolla. El tratamiento a vacío puede tener un efecto desfavorable sobre el rendimiento y la consistencia de la mantequilla.

modificarse para obtener grasa de buena consistencia a pesar del bajo índice de iodo, es decir, cuando la proporción de grasa insaturada es baja.

El proceso de maduración se desarrolla en aproximadamente 12-15 horas. Cuando sea posible, las bacterias productoras de ácido deben añadirse antes del tratamiento térmico. La cantidad de cultivo añadida depende del programa de tratamiento seleccionado con referencia al indice de iodo, según se ve en la Tabla 12.4.

Desde el depósito de maduración, la nata se bombea a la mantequera continua o al bombo. A veces es deseable un paso a través de un intercambiador de calor de placas, donde se le da la temperatura requerida. En el proceso de batido, la nata se agita de forma violenta, con objeto de romper los glóbulos de grasa, provocando la coalescencia de la grasa y la formación de los típicos granos de mantequilla. El contenido graso del líquido remanente, es decir, la mazada, disminuye.

La nata se divide en dos fracciones: granos de mantequilla y mazada. En el batido tradicional, la máquina se detiene cuando los granos han alcanzado un cierto tamaño, procediéndose entonces al drenaje de la mazada. En el caso de las mantequeras continuas este drenaje se hace también de forma continua.

Después del drenaje se amasa la mantequilla hasta conseguir una fase grasa continua, conteniendo una fase acuosa dispersada muy finamente. Fue una práctica muy común el lavado de la mantequilla con agua después del batido, con objeto de eliminar cualquier contenido residual de mazada y de sólidos lácteos, pero esto apenas si se hace en la actualidad. Si se va a proceder al salado de la mantequilla, se espolvorea la sal sobre la superficie de la misma, en el caso del procesado discontinuo. En los sistemas continuos se añade la sal en forma de salmuera a la mantequilla durante la etapa de amasado.

Después del salado, la mantequilla debe amasarse de forma vigorosa, con objeto de asegurar una distribución uniforme de la sal. El amasado de la mantequilla también afecta a sus características de calidad (aroma, sabor, conservación de la calidad, apariencia y color). La mantequilla terminada se descarga en la unidad de envasado y se pasa al almacenamiento refrigerado.

La materia prima

La nata debe ser de buena calidad bacteriológica y libre de defectos de sabor o aroma. El índice de iodo es el factor decisivo en la selección de los parámetros de fabricación. A menos que sea corregido, la grasa con un alto índice de iodo (alto contenido de grasa insaturada) producirá una mantequilla de textura grasienta. Se puede obtener una mantequilla de consistencia aceptable, a partir tanto de grasa dura (índice de iodo inferior a 28) como de grasa blanda (indice de iodo por encima de 42), variando el tratamiento de maduración de acuerdo con el indice de iodo.

La nata que contenga antibióticos o desinfectantes no es apropiada para la fabricación de mantequilla acidificada. Por otra parte, si se ha dado la oportunidad de que crezcan microorganismos patógenos, la nata no debe ser utilizada en la elaboración de mantequilla, incluso si por tratamiento térmico se inactivan los citados organismos. Por ello, es necesario mantener una higiene estricta durante todo el proceso de producción.

En los paises con cadenas de distribución refrigerada de leche cruda se presenta el problema de que se producen cambios en la composición micro-orgánica como consecuencia de los períodos de almacenamiento refrigerado. Donde antes predominaban las bacterias ácido-lácticas dominan ahora las bacterias de alta resistencia al frio, es decir, las *bacterias sicrotróficas*. Estas son normalmente destruidas durante la pasteurización, por lo que no tienen efecto alguno sobre la calidad de la mantequilla. Sin embargo, algunas bacterias sicrotróficas producen enzimas lipolíticas que pueden descomponer la grasa. Pueden soportar temperaturas superiores a los 100ºC. Por ello, es de gran importancia la prevención del desarrollo de bacterias sicrotróficas. Una solución es el enfriamiento de la leche cruda a 2-4ºC inmediatamente después de su llegada a la industria y su almacenamiento a esta temperatura hasta el momento de la pasteurización, o, mejor todavía sería realizar un tratamiento térmico de la leche a 63-65ºC durante 15 segundos y enfriarla hasta 2-4ºC. La pasteurización debe efectuarse tan pronto como sea posible y nunca más tarde de pasadas 24 horas de su recepción.

La nata que contiene antibióticos o desinfectantes no es adecuada para la elaboración de mantequilla ácida.

Pasteurización

La nata se pasteuriza a alta temperatura, a 95ºC o incluso más, y normalmente sin tiempo de mantenimiento. El tratamiento térmico debe ser suficiente para que la prueba de la peroxidasa resulte negativa.

Este tratamiento térmico fuerte destruye no solamente las bacterias patógenas, sino también las bacterias y enzimas que podrían tener efectos perjudiciales sobre el mantenimiento de la calidad de la nata. Por otra parte, dicho tratamiento térmico no debe ser tan alto como para producir defectos tales como el sabor a cocido.

Desaireación al vacío

Si es necesario, se puede proceder a la eliminación, por tratamiento a vacío, de sustancias aromáticas indeseables de carácter volátil. Para ello se calienta en primer lugar la nata hasta 78°C bombeándose después a la cámara de vacío donde existe una presión correspondiente a una temperatura de ebullición de 62°C. Esta presión reducida hace que las sustancias volátiles aromáticas escapen en forma de gases cuando la nata pasa a la etapa posterior de flash-cooling (enfriamiento por aumento brusco de la presión). Después de este tratamiento, la nata vuelve al intercambiador de calor para ser pasteurizada y enfriada, pasando después al depósito de maduración.

El sabor a cebolla es un defecto muy común durante el verano, cuando las plantas de la familia de la cebolla crecen en los campos. Por ello, es a veces necesario seleccionar las natas con objeto de evitar estos fuertes aromas.

Acidificación bacteriana (maduración)

El tratamiento térmico debe ser suficientemente fuerte para que dé resultado negativo el test de la peroxidasa, pero no tan intenso que cause defectos tales como sabor a cocido.

Preparación del cultivo

Los cultivos bacterianos para la fabricación de nata ácida o fermentada se producen tal como se ha descrito en el capítulo 10 "Preparación de cultivos y starters". La adición de bacterias acidificantes da a la mantequilla un aroma fuerte. También se aumenta su rendimiento mantequero.

Los cultivos utilizados son del tipo DL o del tipo L. Estos contienen bacterias productoras de aroma como *Str. diacetilactis* (*Cit*$^{+}$ *Lactococci*) y *Leuc. citrovorum* (*Leuconostoc mesenteriodes ssp. cremoris*), o exclusivamente el último tipo.

En los cultivos del tipo LD la proporción de *Str. diacetilactis* puede variar entre 0.6 y 13%, mientras que el contenido de *Leuc. citrovorum* varía entre el 0.3 y el 5.9% del recuento total bacteriano.

La proporción relativa entre las bacterias productoras de aroma viene determinada por las condiciones de crecimiento en la industria.

El ácido láctico, el diacetilo y el ácido acético son las sustancias aromáticas más importantes producidas por las bacterias. La producción de la más relevante sustancia aromática presente en la mantequilla, el diacetilo, depende de la disponibilidad de oxígeno. Los cultivos deben ser activos, de forma que el crecimiento bacteriano y la producción de ácido sean rápidas. De esta forma se obtienen grandes cantidades de bacterias (alrededor de 1.000 millones de bacterias por ml de cultivo maduro). Una dosis de inoculación del 1% con una temperatura de crecimiento de 20°C debe producir una acidez de 12°SH después de 7 horas y de 18-20°SH, cuando han transcurrido 10 horas. El cultivo debe ser equilibrado. Es importante que la producción de ácido y aroma y la consiguiente reducción en el diacetilo guarde la proporción relativa correcta.

Como medio de crecimiento o sustrato para los cultivos bacterianos se suele utilizar leche desnatada, ya que es más fácil detectar defectos de sabor en cultivos sobre este tipo de leche. La leche debe ser pasteurizada a 90-95°C durante 15-30 minutos. En la Figura 12.3 se muestra el proceso de desarrollo de la acidez y el aroma en un cultivo del tipo DL.

Una producción lenta de ácido es característica de la primera etapa de crecimiento. Durante esta fase, la producción de ácido cítrico y el rendimiento en diacetilo son relativamente insignificantes. En la siguiente fase se acelera la producción de ácido de forma rápida, ya que la fermentación del ácido cítrico da lugar a diacetilo. La mayor parte del diacetilo es reducido por las bacterias productoras de aromas.

Cuando la producción de ácido se va frenando, la reducción del diacetilo disminuye y su contenido más o menos se estabiliza. El cultivo entra en la fase de ma-

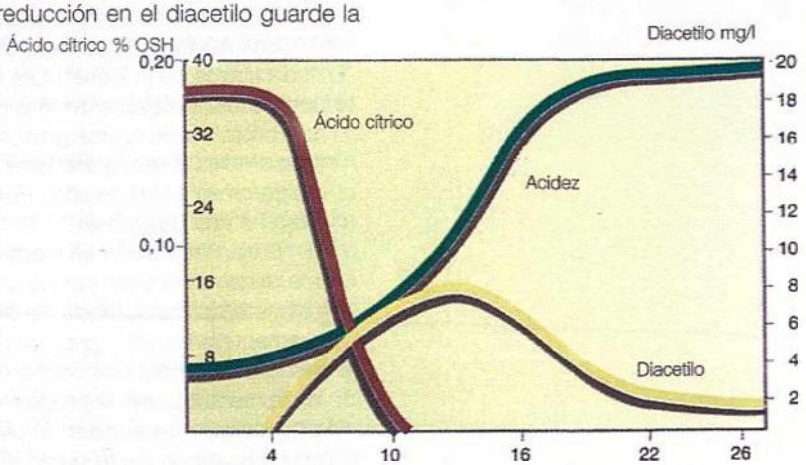


Fig. 12.3 *Desarrollo de aroma y acidez en la leche desnatada a 20°C y con una dosis de 1% de cultivo LD.*

+ *Abbreviation for citrate, which is metabolised to flavour and arma compounds*
ssp = species of (New names for starters - see also Table 10.1 in Chapter 10)

duración cuando acaba la fase de acidificación. Son características de esta fase un incremento muy gradual en la acidez y una reducción del diacetilo a materias no aromáticas, por medio de las bacterias productoras de aroma.

Acidificación de la nata

La acidificación de la nata y el tratamiento térmico que da a la grasa la estructura cristalina necesaria para conseguir una optima consistencia de la mantequilla tiene lugar de forma simultánea en los depósitos de maduración. Estos depósitos están construidos en acero inoxidable, están aislados y van provistos normalmente de camisa por donde circulan los fluidos de calentamiento y enfriamiento. Llevan agitadores rascadores reversibles para conseguir una agitación eficaz incluso cuando la nata ha coagulado. Tanto el calentamiento como el enfriamiento se realizan de forma muy gradual, a temperaturas suaves, lo que es ventajoso desde el punto de vista de la consistencia del producto final.

La cantidad de cultivo industrial añadido a la nata varía desde 1% a 7% dependiendo básicamente de la temperatura de incubación.

El cultivo industrial debe mezclarse de forma concienzuda antes del bombeo al depósito de maduración. A veces, el cultivo se bombea antes que la nata. Algunos fabricantes, sin embargo, prefieren añadir el cultivo en la tubería por donde circula la nata. En cualquier caso, dicho cultivo debe mezclarse cuidadosamente con la nata.

La nata precisa un tratamiento térmico si se quiere que la mantequilla obtenida tenga la consistencia apropiada. El programa de tratamiento depende del índice de iodo de la nata. La temperatura de acidificación también vendrá determinada por este programa, ya que la maduración tiene lugar al mismo tiempo. Es posible modificar el programa de temperaturas que se aplica para controlar la consistencia, de acuerdo con el tipo de cultivos utilizado.

La cantidad de cultivo industrial que se debe añadir a la nata se decide sobre la base del programa de temperatura para el proceso, tal como se indica en la Tabla 12.4. Se debe adaptar a las temperaturas de acidificación y maduración, así como a la duración de las diferentes fases. La dosis de cultivo industrial puede variar entre un 1 y un 7% de la cantidad de nata. La cifra más baja se aplica a la temperatura de 21°C, a la que se mantiene la nata con grasa dura (bajo índice de iodo), y el porcentaje más alto se aplica a la nata con grasa blanda, que se mantiene a una temperatura de 15-16°C. El proceso de acidificación se debe completar cuando el tratamiento térmico ha terminado y la nata pasa al batido. La acidez de la parte no grasa de la nata debe ser entonces alrededor de 36°SH.

Tratamiento térmico

Antes del batido, la nata se somete a un tratamiento según un programa de temperaturas que controlará la cristalización de la grasa, de forma que la mantequilla consiga la consistencia deseada. La consistencia de la mantequilla es una de sus más importantes características de calidad, de forma directa e indirecta, ya que afecta a otras características, principalmente al sabor y al aroma. La consistencia es un concepto complicado que implica propiedades tales como dureza, viscosidad, plasticidad y capacidad de ser extendida.

Los ácidos grasos de la grasa de la leche han sido descritos en el Capítulo 2, "La química de la leche". Las cantidades relativas de ácidos grasos con altos puntos de fusión determinan si la grasa será dura o blanda. La grasa blanda tiene un alto contenido de ácidos grasos con bajo punto de fusión, de forma que a temperatura ambiente esta grasa tiene una gran parte en fase líquida (la proporción grasa líquida/grasa sólida es alta). Por otro lado, en la grasa dura la proporción grasa líquida/grasa sólida es baja.

En la elaboración de mantequilla, si la nata se somete siempre al mismo programa de temperaturas, será la composición química de la grasa de la leche la que determinará la consistencia de dicha mantequilla. La grasa láctea blanda dará lugar a mantequilla blanda y grasienta, mientras que la mantequilla procedente de grasa de leche dura tendrá una consistencia dura y firme. Se puede optimizar la consistencia de la mantequilla si el programa de temperaturas se modifica de acuerdo con el índice de iodo de la grasa. El programa de temperaturas regula la cantidad de grasa sólida hasta un cierto punto. Este es el factor más importante en la determinación de la consistencia de la mantequilla.

Cristalización de la grasa láctea

Después de la pasteurización, la grasa de los glóbulos grasos se encuentra en estado líquido. Cuando la nata se enfría por debajo de 40°C, la grasa comienza a cristalizar. Si el enfriamiento es gradual, las diferentes grasas cristalizarán a distintas

temperaturas, dependiendo de sus puntos de fusión. Esto podría ser una ventaja , ya que este tipo de enfriamiento podría dar lugar a un mínimo de grasa sólida. De esta forma se podría elaborar mantequilla blanda a partir de nata de grasa láctea dura, con bajos índices de iodo. El desarrollo de la cristalización de la nata 40% se discute en el capítulo 8 en el apartado "Producción de nata".

La formación de cristales es muy lenta durante el enfriamiento gradual, y el proceso de cristalización tarda varios dias. Esto podría ser peligroso desde el punto de vista bacteriológico, ya que la grasa se mantiene a temperaturas favorables para ataques bacterianos. También es poco práctico por razones económicas.

El enfriamiento rápido de la nata a una baja temperatura acelera el proceso de cristalización.

Un método para acelerar el proceso de cristalización es el enfriamiento rápido de la nata a bajas temperaturas, donde la formación de cristales es muy rápida. El inconveniente de este método es que los triglicéridos con bajos puntos de fusión se verán "atrapados" en los mismos cristales dando lugar a lo que podríamos llamar cristales mixtos. Si no se toman las medidas adecuadas, una gran proporción de la grasa cristalizará. La proporción de grasa líquida/grasa sólida sería muy baja y la mantequilla hecha a partir de esta nata sería dura.

Esto se puede evitar si la nata se calienta cuidadosamente a una temperatura superior, con objeto de fundir y separar los triglicéridos con bajos puntos de fusión de los cristales. La grasa fundida es entonces recristalizada a una temperatura ligeramente menor, resultando en una proporción mayor de cristales "puros" y en una menor proporcion de cristales mezclados. De esta forma, se puede obtener una más alta proporción de grasa líquida/grasa sólida y una grasa más blanda.

Es obvio que la cantidad de cristales mezclados, y, por lo tanto, la proporción grasa líquida/grasa sólida, puede determinarse hasta un cierto grado mediante la selección del programa de temperaturas de calentamiento al cual los cristales de grasa funden después del enfriamiento y cristalización, y también por la temperatura de recristalización. El programa de temperaturas se selecciona según la dureza de la grasa (indice de iodo).

En la actualidad existen varios métodos para la medida de la proporción grasa líquida/grasa sólida en una muestra. El test del espectrofotómetro RMN es muy rápido y preciso. Esta técnica se basa en el hecho de que los protones (núcleos de hidrógeno) en la grasa tiene propiedades magnéticas distintas dependiendo de si se encuentra en estado líquido o sólido.

La Tabla 12.4 da ejemplos de programas para diferentes indices de iodo. La primera temperatura corresponde a la de enfriamiento de la nata después de la pasteurización. La segunda corresponde a la de calentamiento/acidificación y la tercera a la de maduración.

Tratamiento de la grasa dura

Para obtener una consistencia óptima cuando el valor del índice de iodo es bajo, es decir, cuando la grasa es dura, se debe minimizar la cantidad de cristales mixtos y maximizar la cantidad de grasa "pura" para incrementar la proporción de grasa líquida/grasa sólida en la nata. La fase de grasa líquida en los glóbulos grasos será entonces maximizada. De esta forma una gran parte de ella podrá separarse durante el batido y amasado, dando lugar a una mantequilla con una fase líquida relativamente importante y con una fase sólida grasa minimizada.

El tratamiento necesario para conseguir este resultado consta de las siguientes etapas:

- Enfriamiento rápido hasta unos 8ºC y almacenamiento durante 2 horas a esta temperatura.
- Calentamiento suave hasta 20-21ºC y almacenamiento a esta temperatura durante al menos 2 horas. Como medio calefactor se utiliza agua a una temperatura máxima de 27ºC.
- Enfriamiento hasta unos 16ºC, primero, y, después, hasta la temperatura de batido.

El enfriamiento hasta unos 8ºC da comienzo a la formación de cristales mezclados, que absorben grasa procedente de la fase continua líquida.

Cuando la nata se calienta suavemente hasta 20-21ºC, la mayor parte de los cristales mezclados funde, dejando sólo los cristales puros de grasa con un alto punto de fusión. Durante el periodo de almacenamiento a 20-21ºC, los cristales de grasa fundidos comienzan a recristalizar, formando ahora cristales puros.

Después de 1-2 horas, la grasa con un punto de fusión más alto ha comenzado a recristalizar. Reduciendo la temperatura hasta unos 16ºC, la grasa fundida continua cristalizando y formando cristales puros. Durante el periodo de mantenimiento a 16ºC toda la grasa con punto de fusión de unos 16ºC o superior cristalizará. El tra-

tamiento ha hecho que la grasa de alto punto de fusión forme cristales puros, por lo que se reduce la cantidad de cristales mezclados. Esto aumenta la proporción de grasa líquida/grasa sólida y la mantequilla resultante será, por lo tanto, más blanda.

Tabla 12.4
Principales programas de temperatura ajustados al índice de yodo y a volúmenes recomendados de cultivo, cuando se utilice.

Indice de yodo	Programa de temperatura, °C	% aprox . de cultivo en la nata
<28	8 - 21 - 20	1
28 -29	8 - 21 - 16	2 - 3
30 - 31	8 - 20 - 13	5
32 - 24	6 - 19 - 12	5
35 - 37	6 - 17 - 11	6
38 - 39	6 - 15 - 10	7
>40	20 - 8 - 11	5

Tratamiento de la grasa semidura

Al aumentar el índice de iodo, el calentamiento suave se detiene a una temperatura más baja. Se formará una mayor cantidad de cristales mezclados, absorbiendo más grasa líquida que en el caso del programa de grasa dura. Para índices de iodo de hasta 39, la temperatura de calentamiento puede ser tan baja como 15ºC.

El período de acidificación aumenta a temperaturas más bajas.

Tratamiento de la grasa muy blanda

El método de tratamiento denominado "método de verano" se utitiza cuando el índice de iodo es mayor de 39-40. Después de su pasteurización, la nata se enfría 20ºC y se acidifica durante unas 5 horas a esta temperatura. Se procede a su enfriamiento cuando la acidez es de unos 22ºSH. La nata se enfría hasta unos 8ºC si el índice de iodo es de aproximadamente 39-40, y hasta 6ºC si es de 41 o superior. Generalmente, se cree que las temperaturas de acidificación por debajo de 20ºC dan lugar a mantequilla blanda. Lo mismo se aplica a temperaturas de enfriamiento superiores después de la acidificación.

Batido

Producción discontinua

La nata es batida después del programa térmico, y de ser acidificada, en su caso. La producción de mantequilla se ha hecho de forma tradicional en bombos o mantequeras cilíndricas, cónicas, en forma de cubo o tetraédricas, con velocidad ajustable. En el interior de la mantequera se disponen unos rascadores y unas bandas axiales. La forma, disposición y tamaño de los rascadores en relación a la velocidad de la mantequera son factores que afectan de forma importante al producto final obtenido. Las modernas mantequeras tienen un rango de velocidades que permite la selección de la velocidad de trabajo más adecuada para cualquier tipo de mantequilla que se quiera obtener.

El tamaño de las mantequeras ha aumentado mucho en los últimos años. En las mantequerías grandes y centralizadas se utilizan mantequeras con capacidades de 8.000-12.000 litros o incluso más.

Antes de pasarla a la mantequera, la nata se agita y se ajusta su temperatura. La máquina se llena normalmente hasta un 40-50%, con objeto de dejar espacio para la formación de espuma.

Formación de la mantequilla

Los glóbulos grasos presentes en la nata contienen tanto grasa cristalizada como líquida (aceite de mantequilla). Los cristates de grasa, de alguna manera, se han estructurado para formar una cubierta, aunque débil, próxima a la membrana de los glóbulos de grasa.

Cuando la nata se agita se forma una espuma de burbujas de proteinas de alto peso molecutar. Al ser superficiatmente activas, las membranas de los glóbulos grasos son arrastradas hacia la interfase aire/agua, concentrándose dichos glóbulos de grasa en la espuma formada.

Cuando continua la agitación, las burbujas se hacen más pequeñas, ya que las proteinas expulsan el agua, haciendo que esta espuma sea más compacta y, por lo tanto, ejerciendo una presión sobre los glóbulos de grasa. Esto hace que una parte de la grasa líquida salga de los glóbulos y también que se desintegren algunas membranas.

La grasa líquida, que también contiene cristales de grasa, se extiende formando una fina capa sobre la superficie de las burbujas y sobre los propios glóbulos de grasa. Conforme dichas burbujas se van haciendo más densas, se suelta más grasa y la espuma pronto se encuentra en una situación inestable y se rompe. Entonces, los glóbulos de grasa se coagulan formando granos de mantequilla. Al principio son invisibles al ojo, pero después crecen progresivamente conforme continua el amasado.

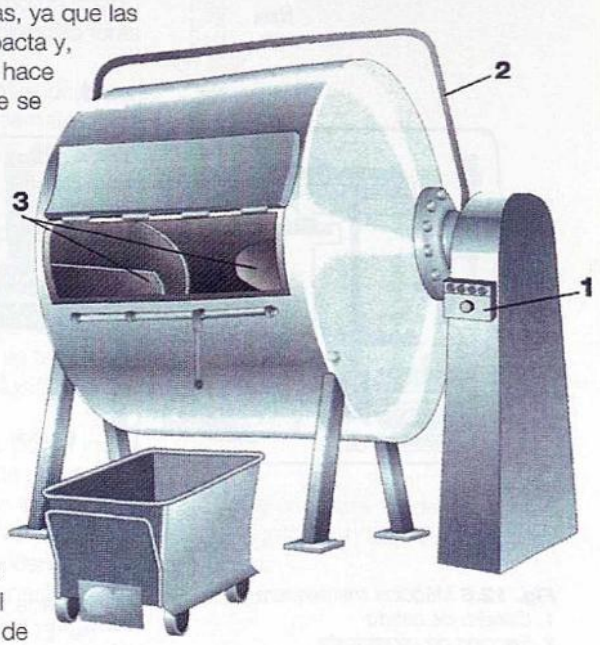


Fig. 12.4 *Mantequera para producción discontinua.*
1. Panel de control
2. Parada de emergencia
3. Aletas inclinadas.

Eficacia del batido

La eficacia del batido es una medida de la cantidad de grasa de la nata que ha sido convertida en mantequilla. Se expresa en términos de grasa que aún permanece en la mazada, como porcentaje de la grasa total de la nata. Por ejemplo, una eficacia de batido de 0.50 quiere decir que el 0.5% del total de la grasa de la nata permanece en la mazada y que el 99.5% restante se ha convertido en mantequilla. El rendimiento del batido se considera aceptabte si su valor es menor de 0.70.

La curva de la Figura 12.5 muestra cómo varía la eficacia del batido a lo largo del año. El contenido en grasa de la mazada es mayor durante el verano.

Amasado

El amasado tiene lugar cuando se ha drenado la mazada. Los granos de mantequilla se prensan y exprimen para eliminar la humedad existente entre ellos. Los glóbulos de grasa se someten a una presión alta y la grasa en forma líquida y en forma cristalina son forzadas a salir. En la masa de grasa resultante (eventualmente la fase continua final) la humedad queda finamente dispersa por el proceso de amasado, que se prolonga hasta conseguir el contenido de humedad requerido. La mantequilla acabada debe ser seca, es decir, la fase acuosa debe estar muy finamente dispersa. No debe ser visible al ojo ninguna gota de agua.

Durante el proceso de amasado se mide y ajusta el contenido de humedad de forma que se alcancen los valores requeridos en la mantequilla final.

Amasado al vacío

El amasado a una presión de aire reducida es un método frecuentemente utilizado en la actualidad. El resultado es una mantequilla que contiene menos aire y que es, por lo tanto, algo más dura de lo normal. En la mantequilla obtenida por este procedimiento las cantidades de aire suelen ser del 1% en volumen, comparadas con el 5-7% para la mantequilla normal.

Fig. 12.5 *Variación del rendimiento en el batido durante el año (Suecia).*

Producción continua de mantequilla

Al final del siglo XIX se introdujeron distintos métodos para la fabricación en régimen continuo de mantequilla, pero su aplicación fue muy limitada. En los años 40 se volvieron a estudiar estos sistemas, dando lugar a tres procesos diferentes, todos ellos basados en los métodos tradicionales: batido, centrifugación y concentración o emulsificación. Uno de estos procesos, basado en el batido convencional, fue el método de Fritz. Este se utiliza ahora sobre todo en la Europa Occidental. En las máquinas basadas en este método, la mantequilla se hace de forma más o menos similar a los métodos tradicionales. La mantequilla es básicamente la misma, excepto que es algo mate y más densa como resultado de una dispersión más fina y uniforme del agua.

El proceso de fabricación

La nata se prepara de la misma forma que para el batido convencional, antes de pasar de forma continua desde los depósitos de maduración hasta la mantequera.

En las Figuras 12.6 y 12.7 se ven secciones de una máquina mantequera. En primer lugar, la nata pasa a un cilindro batidor con doble enfriamiento (1), equipado con batidores accionados por un motor de velocidad variable.

El proceso de conversión en el cilindro es rápido, y cuando se ha acabado los granos de mantequilla y la mazada pasan a la sección de separación (2), también

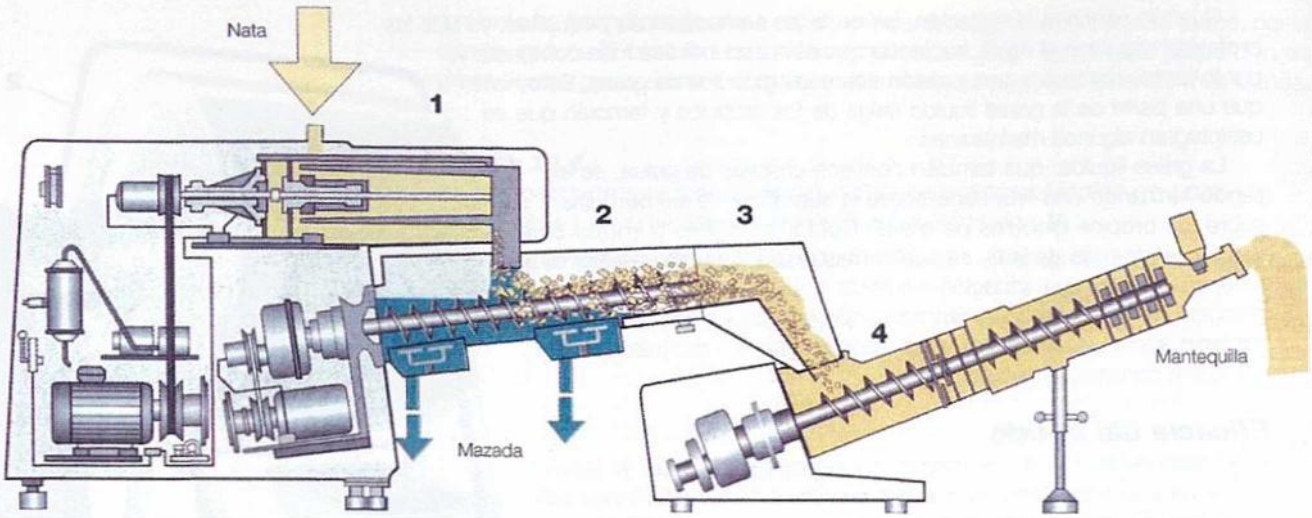


Fig. 12.6 *Máquina mantequera continua.*
1. Cilindro de batido
2. Sección de separación
3. Sección de prensado-secado
4. Segunda sección de amasado

llamada primera sección de amasado, donde la mantequilla se separa de la mazada. El primer lavado de los granos de mantequilla tiene lugar en continuo con mazada enfriada y recirculada. La sección de separación está equipada con un tornillo que inicia el amasado de la mantequilla al mismo tiempo que es transportada hasta la siguiente etapa.

Al abandonar la sección de separación, la mantequilla pasa a través de un canal cónico y de una placa perforada, la llamada sección de secado y exprimido (3), donde se elimina la mazada aún retenida. Desde esta sección, los granos de mantequilla pasan a la segunda sección de amasado (4). Cada sección de amasado tiene su propio motor, de forma que pueden funcionar a diferentes velocidades para conseguir un resultado óptimo. Normalmente, el primer tornillo gira a doble velocidad que el de la segunda sección. A continuación de la última etapa de amasado se puede añadir sal a través de un inyector de alta presión situado en la cámara de inyección (5).

La siguiente sección es la de amasado a vacío (6), que está conectada a una bomba de vacío. En esta sección es posible reducir el contenido en aire de la mantequilla hasta el mismo nivel de la obtenida por el sistema de batido convencional.

La última etapa de amasado (7) se compone de cuatro pequeñas secciones, cada una de las cuales está separada de la adyacente por medio de una placa perforada. Los agujeros de las placas son de diversos diámetros y llevan palas de amasado de diferentes formas, con objeto de dar un tratamiento óptimo a la mantequilla. En la primera de estas pequeñas secciones hay también un inyector para el ajuste final del contenido en humedad. Una vez regulado, el contenido en humedad de la mantequilla se puede mantener con un margen del 0.1%, siempre y cuando las características de la nata permanezcan constantes.

Se pueden instalar transmisores (8) a la salida de la máquina para control del contenido en humedad, sal, densidad y temperatura. Las señales procedentes de dichos instrumentos pueden ser utilizadas para un control automático de estos parámetros.

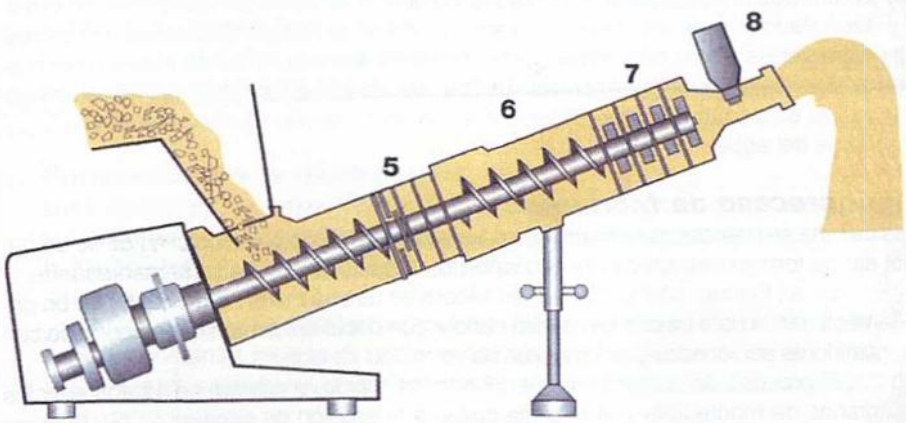


Fig. 12.7 *Sección de amasado al vacío.*
5. Sección de inyección
6. Sección de amasado al vacío
7. Etapa de amasado final
8. Unidad de control de humedad

La mantequilla terminada es descargada desde la boquilla final como un chorro continuo en el silo de mantequilla antes de su envío a las máquinas empastilladoras (envasadoras).

En el mercado se dispone de máquinas mantequeras continuas para unas capacidades de producción de 200-5.000 kg/h de mantequilla a partir de nata ácida y 200-10.000 kg/h de mantequilla a partir de nata dulce.

Nuevas tendencias y expectativas en productos para untar

Desde principios de siglo el modelo de consumo de grasas comestibles se ha desplazado desde la mantequilla hacia la margarina. Durante los años 80 se tenía también una clara tendencia hacia productos con contenidos grasos reducidos o bajos.

Estos cambios en los hábitos del consumidor se pueden explicar por el incremento del uso de alimentos preparados y por una mayor conciencia de salud.

Tal como se ha mencionado en la introducción de este capítulo, en los años 70 aparecieron en el mercado nuevos productos lácteos para untar. La ventaja generalmente anunciada para estos productos era su mayor facilidad de extensión a la temperatura del frigorífico, aunque algunos también se desarrollaron específicamente para satisfacer la creciente demanda de productos con bajo contenido de grasa, sin sacrificar el sabor de la mantequilla. Dos ejemplos del mercado sueco son los productos *Bregott* y *Lätt & Lagom*, ahora perfectamente establecidos en el mercado.

Existe una clara tendencia hacia los productos con bajo contenido en grasa.

Bregott

El Bregott es un producto para untar con un 80% de contenido de grasa, del cual un 70-80% es grasa láctea y un 20-30% es aceite líquido vegetal, como aceite de soja o aceite de colza. La técnica de elaboración es similar a la de la mantequilla.

Como el Bregott contiene aceite vegetal está clasificado como margarina. Este producto se puede utilizar también para cocinar.

Lätt & Lagom

En Suecia se le define de forma legal como una margarina "blanda" (las normas de la IDF sugieren esta designación -o mezcla de bajo contenido graso), lo que quiere decir que su contenido en grasa debe estar comprendido entre 39 y 41 gramos por cada 100 gramos de producto. Este tipo de producto se denomina también *minarina*.

Este producto se utiliza exclusivamente para untar. No debe emplearse para cocinar ni hornear, y mucho menos para freir, debido a su alto contenido en proteina. El proceso de fabricación es esencialmente el mismo que para la margarina.

El aceite de mantequilla -o estrictamente hablando la grasa láctea anhidra (GLA)- y el aceite de soja o aceite de colza se mezclan en proporciones determinadas para conseguir que el producto sea untable a las temperaturas típicas del frigorífico doméstico. Después de la mezcla se añade una apropiada cantidad de fase acuosa, que también contiene proteina procedente de mazada acidificada. La mezcla entera se pasteuriza en un intercambiador de calor de placas y finalmente se enfria mientras se amasa en enfriadores especiales de superficie rascada y rotores provistos de "dedos".

La presencia de GLA y de proteina de mazada le confiere al producto un aroma como de mantequilla.

Un nuevo método de elaboración de estos productos, incluyendo la mantequilla, es el proceso TetraBlend.

Proceso TetraBlend™

Este proceso es una combinación de dos conocidos pasos de proceso: concentración de nata, y cristalización combinada con inversión de fase.

La nata normalmente se concentra hasta un 75-82% de contenido de grasa en una separadora hermética, donde la fase pesada es la leche desnatada, aquí también denominada mazada, que contiene menos grasa que la mazada obtenida a partir del proceso de elaboración tradicional de mantequilla. En muchos casos, la leche desnatada tiene un valor más alto como subproducto que la mazada.

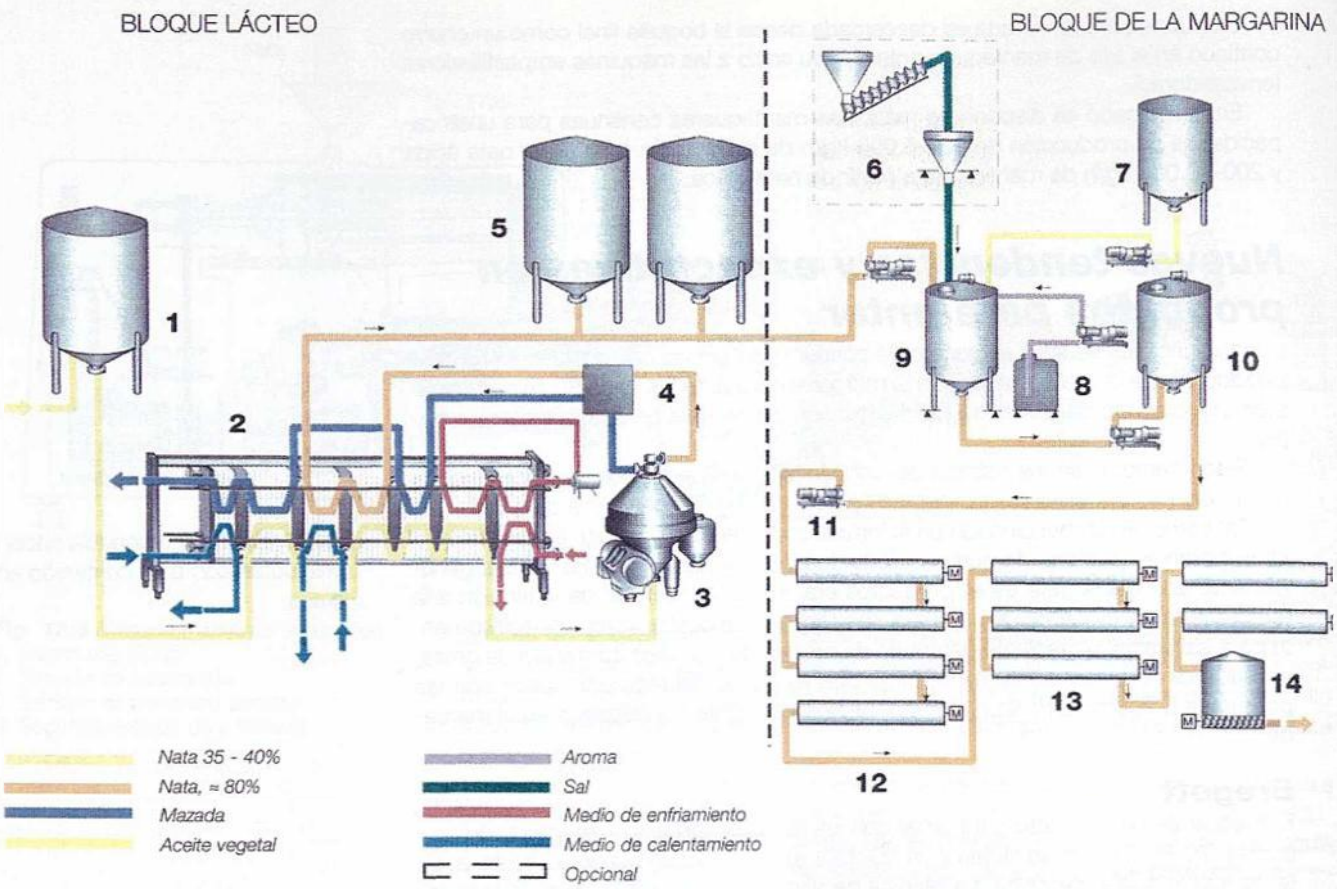


Fig. 12.8 *Línea de proceso TetraBlend para la producción de mantequilla y productos lácteos para untar.*

Bloque lechería

1. *Tanque de nata*
2. *Intercambiador de calor de placas*
3. *Centrífuga concentradora de nata*
4. *Normalización de la nata*
5. *Tanques de pre-cristalización*

Bloque margarina

6. *Dosificación de sal, opcional*
7. *Tanques de aceite vegetal*
8. *Dosificación de aromas*
9. *Mezclado*
10. *Tanque de pulmón*
11. *Bomba de alta presión*
12. *Enfriador de superficie rascada*
13. *Rotores*
14. *Depósito con transportador en el fondo*

Para la fabricación de productos para untar con un contenido de grasa del 40-60%, la nata concentrada con un 75-80% de grasa se diluye con agua antes del procesado, con lo que se obtiene un contenido más bajo de proteinas y lactosa. Cuando se procesa nata con el mismo contenido de grasa que el producto final, cuanto mayor es el contenido de proteinas y lactosa peor es el aroma del producto para untar.

Una ventaja adicional del uso de nata concentrada como base para la elaboración de productos con bajo contenido graso es que no se necesita añadir un emulsionante, ya que los emulsionantes naturales de la leche están presentes en la nata.

Línea de proceso

La línea de proceso consta fundamentalmente de dos bloques:

1. Un típico "bloque lácteo" que incluye la concentración de la nata, la pasteurización y el enfriamiento.
2. Un típico "bloque de margarina" donde se realiza la preparación del mix y la inversión de fase acompañado del amasado y enfriamiento.

La línea de proceso se ilustra en la Figura 12.8.

Bloque lácteo (a la izquierda de la línea de trazos de la Figura 12.8)

El proceso comienza con la nata pasteurizada de 35-40% de contenido graso. Como la nata puede proceder de otra industria láctea o de un tanque de almacenamiento de nata de la propia fábrica, se debe ajustar la temperatura a 60-70ºC antes de entrar en el concentrador de nata, que es una máquina centrífuga hermética. El grado de concentración, como el contenido de grasa de la nata, se controla automáticamente por medio de un dispositivo continuo de normalización descrito en el capítulo 6.2. Se pueden conseguir contenidos de grasa de hasta el 82%, (en casos especiales incluso hasta el 84%). Después de la normalización en grasa, la nata se enfría hasta 18-20ºC antes de ser enviada al tanque de mantenimiento/pre-cristalización.

Bloque margarina (a la derecha de la línea de trazos)

Esta parte de la línea de proceso comienza con una operación discontinua donde se prepara la mezcla del producto. Se mezclan juntos varios ingredientes de acuerdo con una receta determinada para elaborar el producto en cuestión. En esta fase se mezcla la nata concentrada con un volumen apropiado de aceite vegetal, sal y

fase acuosa, en este orden. Después, la mezcla se bombea hasta un tanque pulmón (10) y se puede preparar un nuevo lote.

El proceso es continuo desde el tanque pulmón, desde donde se toma la mezcla de producto por una bomba de alta presión (11). Se alimenta a continuación a los enfriadores de superficie rascada (12), donde tiene lugar la inversión de fase. Antes del enfriamiento final el producto para untar se mantiene y se trabaja con rotores de "dedos" (13). A la salida de la etapa de enfriamiento final, el producto entra al silo de almacenamiento (14) desde donde se bombea a la máquina de envasado, que a menudo se trata de una máquina de llenado en tubo.

El proceso entero se controla desde un ordenador de proceso y otro para recetas.

Empaquetado

Existen tres métodos básicos para el transporte de mantequilla, o productos lácteos para untar, desde la máquina hasta el envasado:

- El producto es descargado en un silo con un transportador de tornillo en el fondo. Dicho tornillo lo enviará hasta la máquina de envasado.
- El producto se bombea directamente hasta la envasadora.
- Transporte por medio de carretillas llenas de producto, que a menudo llevan tornillos transportadores. También se puede utilizar una combinación de estos métodos.

La mantequilla se puede envasar en grandes envases de más de 5 kg y en paquetes desde 10 gramos hasta 5 kg. Dependiendo del tipo de envase, se pueden utilizar varios modelos de máquinas. Normalmente estas máquinas están completamente automatizadas, y tanto las máquinas formadoras de porciones como las empaquetadoras pueden ajustarse para trabajar con distintos tamaños, como, por ejemplo, 250 g y 500 g, ó 10 g y 15 g.

El material de envoltura debe ser a prueba de grasas e impermeable a la luz, así como a las sustancias aromáticas. También debe ser impermeable a la humedad, ya que en caso contrario la superficie de la mantequilla se secaría y las capas exteriores adquirirían un color más amarillo que el resto de la mantequilla.

La mantequilla se envuelve normalmente en láminas de aluminio, aunque también se utiliza todavía papel de pergamino. Antiguamente, este último era muy utilizado, pero debido a su pobre impermeabilidad ha sido reemplazado en gran medida por láminas de aluminio.

Después de realizada esta operación de envoltura, los paquetes de pastillas o barras de mantequilla se llevan a una máquina encartonadora donde se meten en cajas de cartón, que a su vez son cargadas en palés y llevadas a cámaras frigoríficas.

La Figura 12.2 muestra el transporte de la mantequilla desde el equipo de batido hasta las máquinas de envasado.

Los productos lácteos para untar son mayoritariamente envasados en tubos con una capacidad de 250-600 gramos.

Almacenamiento frigorífico

Con objeto de mantener su consistencia y apariencia, la mantequilla y los productos lácteos para untar se deben almacenar en cámaras frigoríficas, tras la operación de envasado, y mantenerse a +5°C.

Métodos experimentales de fabricación de mantequilla

Se han hecho muchas tentativas para desarrollar nuevos métodos de fabricación, con objeto de producir mantequilla sin propiedades negativas. Uno de éstos, el método NIZO (alemán), utiliza nata dulce como materia prima.

Después de la formación de la mantequilla se drena toda la cantidad que se pueda de mazada. Consecuentemente, esta mazada dulce contiene la mayor parte de los iones de cobre. Se procede entonces a la adición de ácido láctico producido externamente, junto con un cultivo microbiano especial, con objeto de producir la acidificación bacteriana que da a la mantequilla el aroma que necesita. Este método tiene un rendimiento relativamente bueno y la mazada obtenida es dulce. La mante-

quilla tiene su olor característico, se conserva bien y es muy resistente a la oxidación.

Es probable que diversos métodos similares sean adoptados en el futuro inmediato si las pruebas que se están realizando ahora dan el resultado esperado. Sin embargo, existen aún varios obstáculos. Los métodos están prohibidos en los países donde no se permite la adición de sustancias extrañas (ácido láctico) a los productos lácteos.

Capítulo 13

Grasa láctea anhidra. Aceite de mantequilla

La grasa láctea anhidra (GLA) y el aceite de mantequilla son productos que consisten en grasa láctea más o menos pura. Aunque son modernos productos industriales, tienen unas raices tradicionales ancestrales en algunas culturas. El denominado *Ghee*, un producto de grasa láctea con más proteina y un sabor más pronunciado que la GLA, ha sido conocido en paises como la India y Arabia durante cientos de años.

Los productos a base de grasa láctea anhidra se elaboran según tres calidades distintas, especificadas en la norma FIL-IDF International Standard 68A(de 1977):

- **Grasa Láctea Anhidra**, que debe contener al menos un 99.8% de grasa láctea y se debe fabricar a partir de nata fresca o mantequilla. No se permiten aditivos, por ejemplo para la neutralización de los ácidos grasos libres.
- **Aceite de Mantequilla Anhidro**, que debe contener al menos un 99.8% de grasa láctea, pero que puede estar fabricada a partir de nata o mantequilla de diferente madurez. Está permitido el uso de alcalis para neutralizar los ácidos grasos libres.
- **Aceite de Mantequilla**, que debe contener un 99.3% de grasa láctea. La materia prima y las especificaciones de proceso son las mismas que para el Aceite de Mantequilla Anhidro.

En este capítulo la expresión GLA se utilizará para todos los productos descritos en la norma FIL-IDF International Standard 68A (de 1977).

Características de la GLA

La GLA es una excelente forma de almacenamiento y transporte de grasa láctea ya que requiere menos espacio que la mantequilla, que era la forma tradicional de almacenamiento de la grasa láctea.

La mantequilla es considerada como un producto fresco, aunque normalmente puede almacenarse a +4°C durante 4-6 semanas. Si se almacena durante un periodo de tiempo más largo, es decir hasta 10-12 meses, se recomienda una temperatura máxima de almacenamiento de -25°C.

La GLA normalmente se envasa en bidones de 200 litros con un gas inerte, nitrógeno (N_2), y se puede almacenar durante meses a +4°C. La GLA es un líquido a temperaturas superiores a 36°C y es sólida por debajo de 16-17°C.

La GLA es conveniente utilizarla en forma líquida debido a que es más fácil de mezclar y dosificar en otros productos. De aquí que la GLA sea utilizada para re-

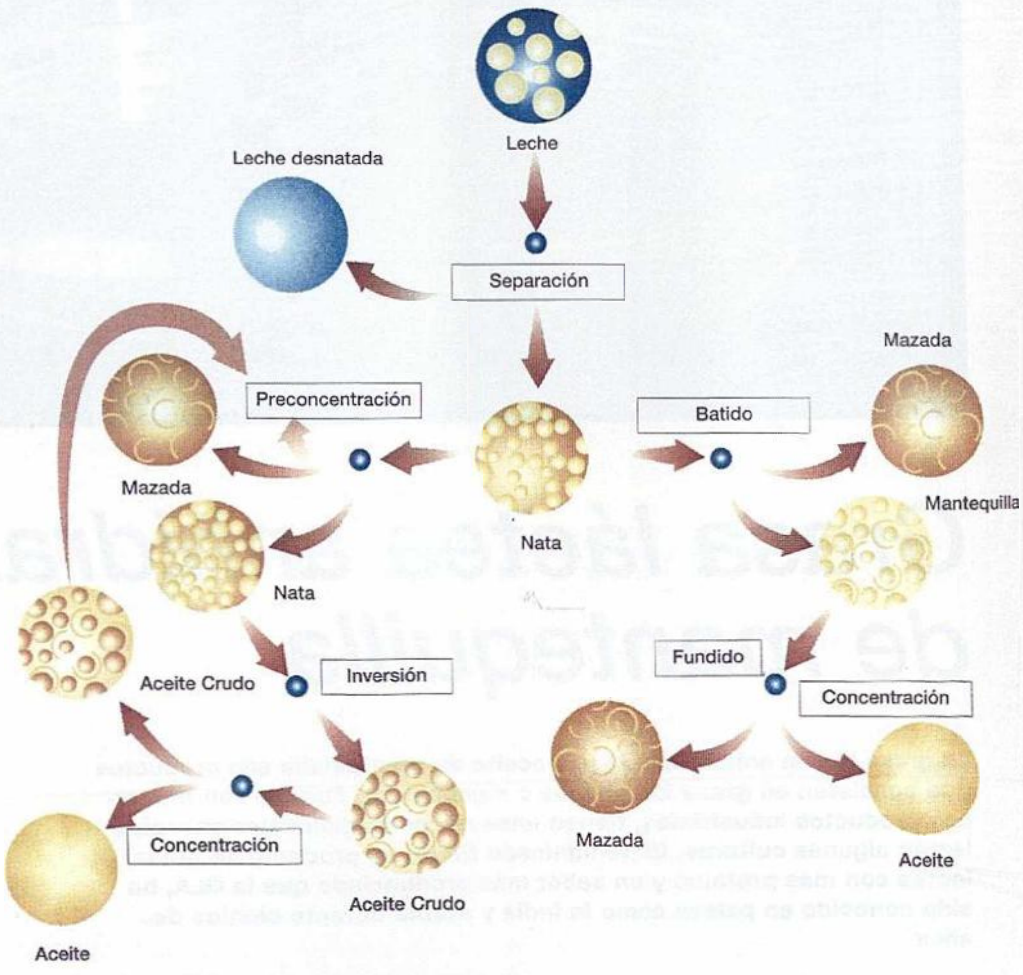


Fig. 13.1 *Bases de la producción de GLA: Concentración de la grasa láctea, inversión de fase, concentración de aceite.*

combinación de distintos productos lácteos, aunque es también usada en las industrias de fabricación de chocolate y helados de crema.

La demanda de mantequilla está disminuyendo, entre otras cosas porque está aumentando el uso de GLA. Uno de los campos de aplicación donde el uso de GLA se incrementará es en las "mezclas" (o "blends") de diferentes contenidos grasos y con mezclas de mantequilla y aceites vegetales, en la fabricación de productos con diferentes propiedades funcionales.

Los productos grasos habituales para diferentes aplicaciones se pueden obtener mediante fraccionamiento de la GLA.

Producción de la GLA

Principios de producción

La producción de GLA se lleva a cabo principalmente siguiendo dos métodos. En uno de ellos se fabrica directamente y en continuo a partir de nata (de leche), mientras que en el otro se utiliza mantequilla. El diagrama de bloques de la Figura 13.2 muestra los dos métodos.

La calidad de la GLA se debe sobre todo a la calidad de la materia prima, de manera que no se tendrán prácticamente diferencias sea cual sea el método de elaboración elegido. Si, por cualquier razón, las calidades respectivas de la nata y de la mantequilla se considera que no son suficientemente buenas, se tienen posibilidades de mejorar las mismas mediante abrillantado (lavado) del aceite o su neutralización antes de pasar a la evaporación final. La forma de llevar a cabo cualquiera de estas operaciones se discute después en el apartado de refinado de la GLA.

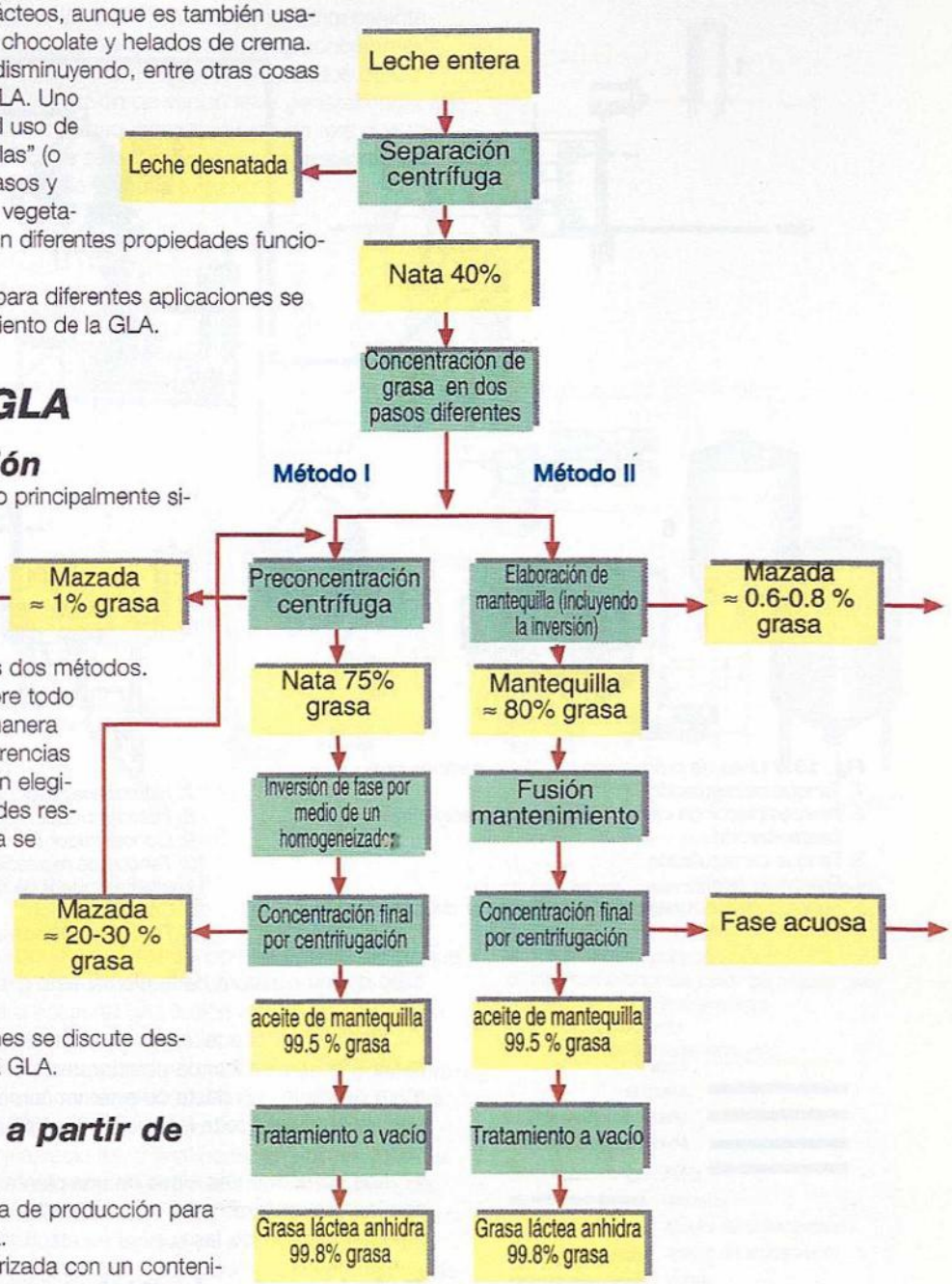


Fig. 13.2 *Diagrama de bloques del proceso de producción.*

Fabricación de la GLA a partir de nata

En la Figura 13.3 se muestra una linea de producción para la fabricación de GLA a partir de nata.

La nata pasteurizada o no pasteurizada con un contenido de grasa del 35-40% entra en la planta de fabricación de GLA a través del tanque de regulación (1) y se envía, al del intercambiador de calor de placas (2) para el ajuste de temperatura o pasteurización. Después pasa a la centrífuga (4) para la preconcentración de la grasa hasta un 75%. (La temperatura de preconcentración después del intercambiador de calor de placas (11) se mantiene a aproximadamente 60°C). La fase "ligera" se recoge en un tanque pulmón (6) en espera de su procesado posterior, mientras que la fase "pesada", denominada mazada, se puede pasar a través de la separadora (5) para recuperar la grasa que se mezclará a continuación con la nata entrante (3). La leche desnatada regresa al intercambiador de calor de placas (2) para recuperación de calor y después pasa a un tanque de almacenamiento.

Tras el almacenamiento intermedio en tanque (6) el concentrado de nata se pasa a un homogeneizador (7) para realizar la inversión de fase, tras la cual se pasa a través del concentrador final (9).

Como el homogeneizador opera según una capacidad ligeramente mayor que la del concentrador final, el producto excedente que no pasa por el concentrador se recircula hacia el tanque pulmón (6). Parte de la energía mecánica utilizada en el proceso de homogeneización se convierte en calor. Para evitar distorsiones en el

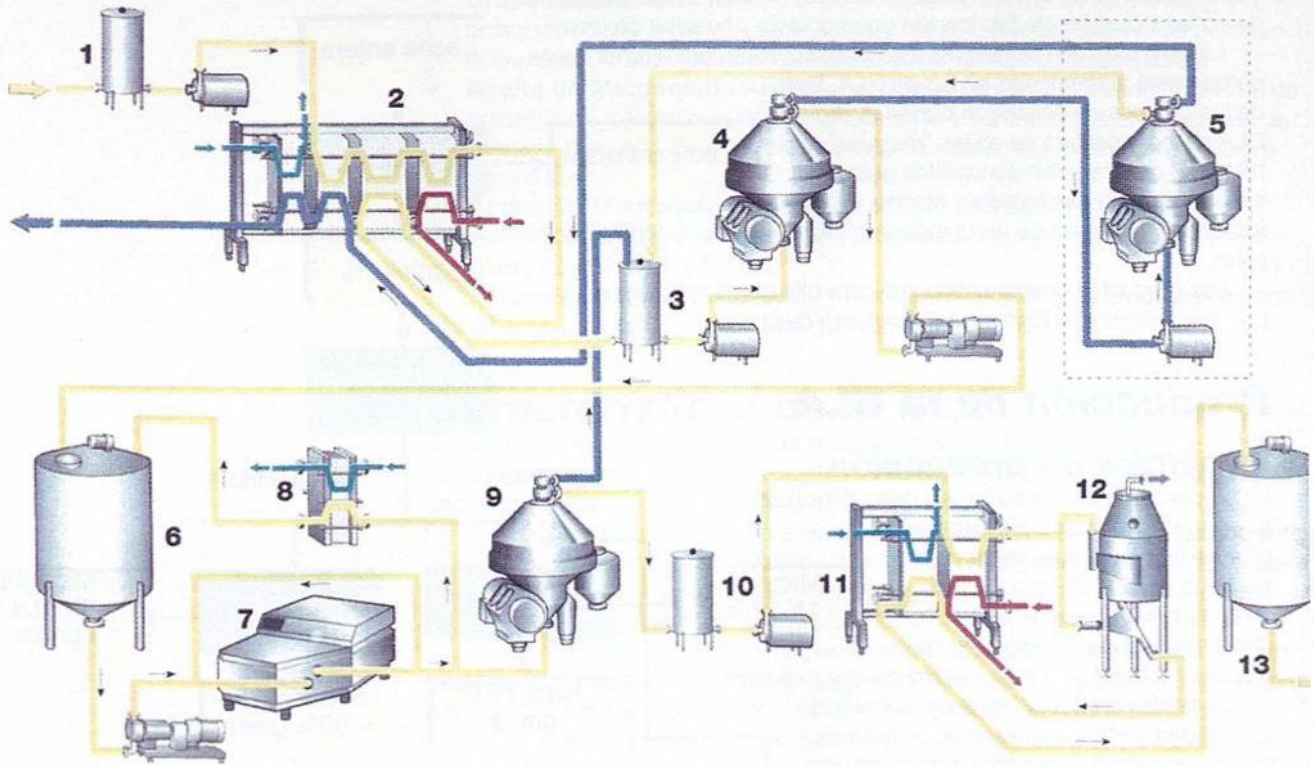


Fig. 13.3 *Línea de producción de GLA a partir de nata.*

1. *Tanque de regulación*
2. *Intercambiador de calor de placas para calentamiento o pasteurización*
3. *Tanque de regulación*
4. *Preconcentrador*
5. *Separadora (opcional) de "mazada" a partir del preconcentrador (4)*
6. *Tanque de pulmón*
7. *Homogeneizador para inversión de fase*
8. *Intercambiador de calor de placas para enfriamiento*
9. *Concentrador final*
10. *Tanque de regulación*
11. *Intercambiador de calor de placas para calentamiento/enfriamiento*
12. *Cámara de vacío*
13. *Tanque de almacenamiento*

Nata
Mazada
Medio de calentamiento
Medio de enfriamiento
Vapor

ciclo de temperatura de la planta, este excedente de calor se elimina en el enfriador (8).

Finalmente, el aceite con un contenido de grasa del 99.5% se precalienta hasta 95-98°C en un intercambiador de calor de placas (11) y se envía hasta una cámara de vacío (12) hasta obtener un contenido de humedad inferior a 0.1%, tras lo cual se enfría el aceite (11) hasta 35-40°C, que es la temperatura habitual de envasado.

Los componentes clave de una planta de GLA, con nata como materia prima, son las separadoras para la concentración de la grasa y los homogeneizadores para la inversión de fase.

Fabricación de GLA a partir de mantequilla

La GLA se produce con frecuencia a partir de mantequilla, especialmente a partir de mantequilla que no se espera utilizar dentro de un período de tiempo razonable. Se ha encontrado por experiencia que puede haber alguna dificultad en conseguir un aceite completamente brillante, tras el paso de concentración final, cuando se parte de mantequilla recien elaborada. El aceite tiende a estar ligeramente enturbiado. Este fenómeno no ocurre cuando se utiliza mantequilla previamente almacenada durante dos semanas o más.

La causa de este fenómeno no se conoce totalmente, pero se sabe que se produce algún tiempo después (unas semanas) del batido, antes de que se desarrolle totalmente el "cuerpo" de la mantequilla. Se ha notado que cuando se calientan muestras de mantequilla, la emulsión de mantequilla fresca parece ser más difícil de dividir que la de mantequilla envejecida y no aparece tan brillante.

La nata dulce y la mantequilla no salada son las materias primas habituales, aunque la nata ácida y la mantequilla salada se pueden utilizar también.

La Figura 13.4 muestra una planta estándar para la producción de GLA a partir de mantequilla. La planta es alimentada con mantequilla que viene en cajas (de 25 kg) que han sido almacenadas durante algún tiempo. La materia prima puede ser también mantequilla congelada almacenada a -25°C.

Una vez que la mantequilla se saca de las cajas, se funde mediante calentamiento indirecto en un equipo fundidor. Antes de que comience la concentración final, la temperatura de la mantequilla fundida debe haber alcanzado los 60°C.

La fusión por calentamiento directo (inyección de vapor) lleva generalmente a la formación de un nuevo tipo de emulsión con pequeñas burbujas de aire que forman una fase dispersa, que es muy difícil de separar. En la concentración posterior esta fase se concentra junto con el aceite y causa turbidez.

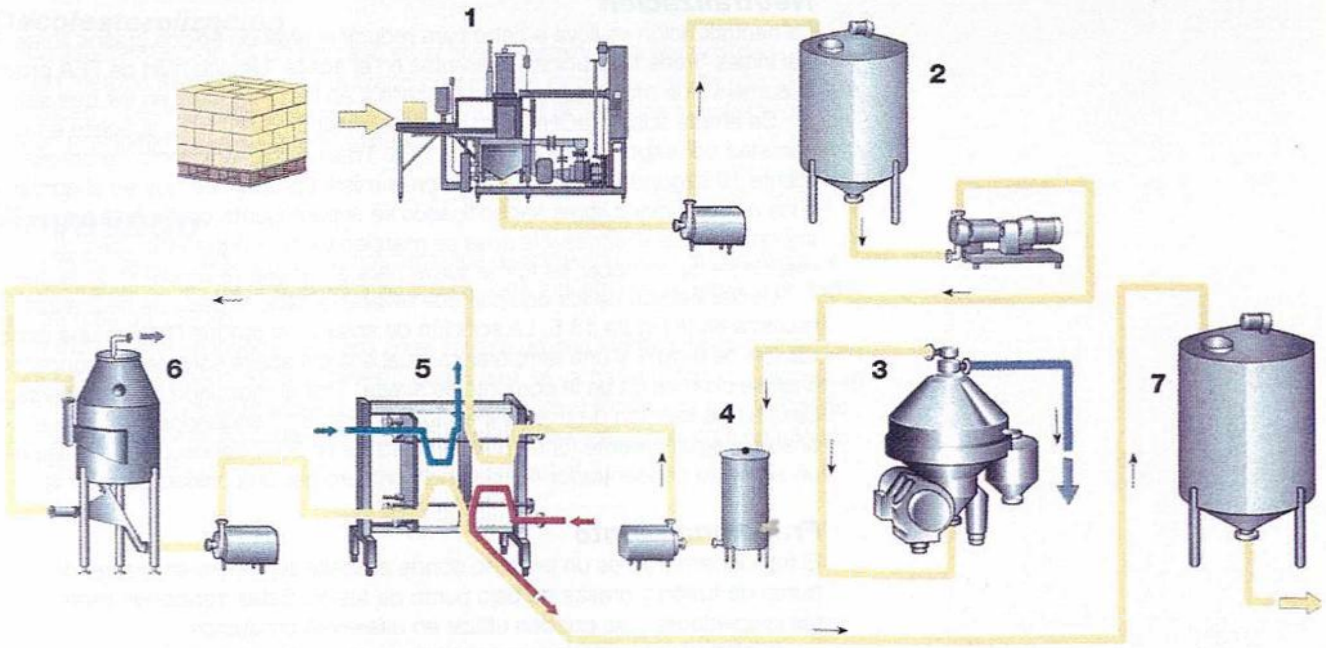


Fig. 13.4 *Línea de producción de GLA a partir de mantequilla.*

1. *Fundidora y calentadora de mantequilla*
2. *Tanque de mantenimiento*
3. *Concentrador*
4. *Tanque de regulación*
5. *Intercambiador de calor de placas para calentamiento/enfriamiento*
6. *Cámara de vacío*
7. *Tanque de almacenamiento*

Nata
Mazada
Medio de calentamiento
Medio de enfriamiento
Vapor

Tras la fusión y calentamiento el producto caliente se bombea hasta un tanque de mantenimiento (2) donde se puede mantener durante un cierto período de tiempo, 20-30 min, principalmente para asegurar una fusión completa, pero también para que se agreguen las proteinas.

Desde el tanque de mantenimiento el producto se bombea hasta el concentrador final (3), tras lo cual la fase ligera, que contiene el 99.5% de grasa, se pasa a un intercambiador de calor de placas (5) para calentamiento hasta 90-95°C, pasandose a continuación a una cámara a vacío (6), y finalmente se retorna hasta el intercambiador de calor de placas (5) para enfriamiento hasta la temperatura de envasado de 35-40°C.

La fase pesada se puede bombear hasta un tanque de mazada o hacia un tanque de recogida de residuos, dependiendo de si es "pura" o está contaminada con neutralizador.

Si la mantequilla viene directamente de una mantequera continua, el riesgo de obtener un aceite turbio aumenta como en el caso anteriormente citado de mantequilla fresca. Sin embargo, con un concentrador final de diseño hermético es posible regular el nivel dentro de la máquina para obtener una fase de aceite brillante con un 99.5% de grasa, con un volumen ligeramente más bajo, y una fase pesada de contenido graso relativamente alto, alrededor de 7% de grasa, con un volumen ligeramente más alto. La fase pesada se debe entonces volver a separar y la nata obtenida se recicla mezclándola con la nata que se alimenta a la mantequera continua.

Refinado de la GLA

La GLA se puede refinar para distintos fines. Ejemplos de procesos de refinado de la GLA son:

- Abrillantado
- Neutralización
- Fraccionamiento
- Decolesterolización

Abrillantado

El abrillantado implica el lavado del aceite con agua para obtener un producto claro y brillante. En este paso se añade un 20-30% de agua al aceite procedente del concentrador final. La temperatura del agua debe ser la misma que la temperatura del aceite. Tras un corto tiempo de mantenimiento el agua se separa de nuevo, extrayendo sustancias solubles en agua (principalmente proteinas).

Neutralización

La neutralización se lleva a cabo para reducir el nivel de ácidos grasos libres (FFA del inglés "freee fatty acids") presentes en el aceite. Un alto nivel de FFA provoca el aumento de malos sabores en el aceite y en los productos en los que se utiliza.

Se añade sosa (NaOH), con una concentración de 8-10%, al aceite en una cantidad correspondiente al nivel de FFA. Tras un mantenimiento de aproximadamente 10 segundos se añade agua en la misma proporción que en el abrillantado, y los ácidos grasos libres saponificados se separan junto con la fase acuosa. Es importante que el aceite y la sosa se mezclen bien, aunque esta operación de mezcla se ha de hacer de forma suave para evitar una re-emulsión de la grasa.

La disposición de los equipos que llevarán a cabo el paso de neutralización se muestra en la Figura 13.5. La solución de sosa en el tanque (1), con una concentración de 8-10% y una temperatura igual a la del aceite saliente del concentrador final, se dosifica (2) en la corriente de aceite. Tras el mezclado (3) la corriente se pasa a una sección de mantenimiento (4) durante 10 segundos, tras lo cual se añade el agua caliente (5) en una cantidad de un 20% del caudal que pasa hacia un segundo concentrador (6), pasando primero por una unidad de mezcla (7).

Fraccionamiento

El fraccionamiento es un proceso donde el aceite se separa en grasas de alto punto de fusión y grasas de bajo punto de fusión. Estas fracciones tienen diferentes propiedades y se pueden utilizar en diferentes productos.

Existen varios métodos de fraccionamiento de la grasa, pero el más común es uno en el que no se utilizan aditivos. El proceso se puede describir brevemente como sigue:

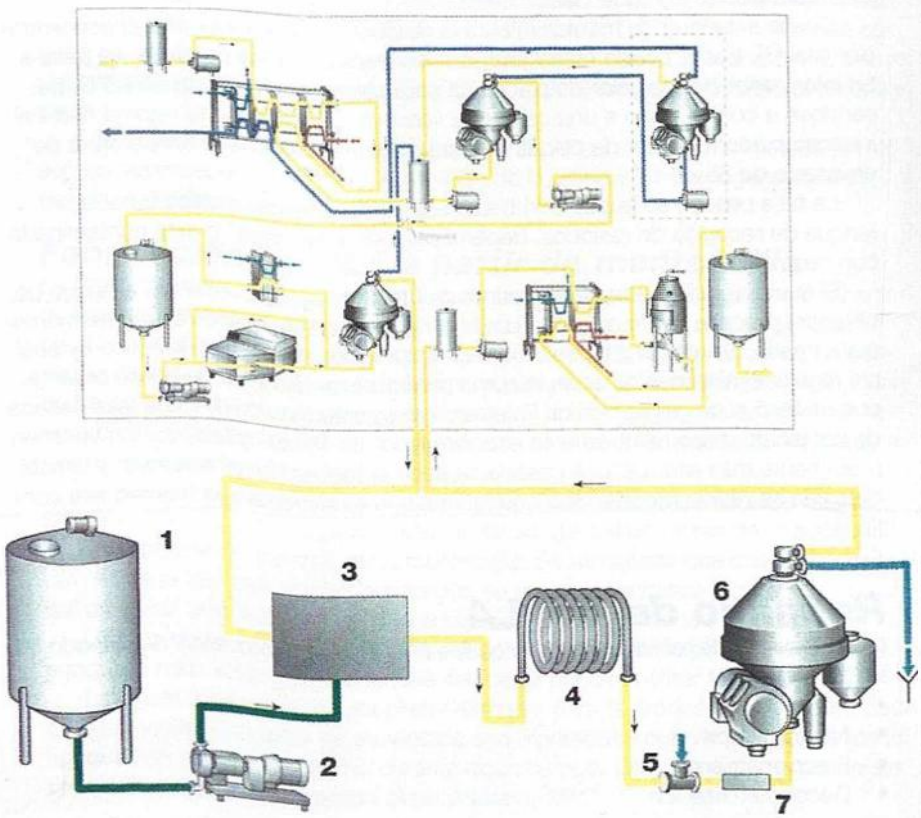


Fig. 13.5 *La neutralización de los ácidos grasos libres (FFA) puede ser uno de los procesos de refinado en la producción de Grasa Láctea Anhidra o Aceite de Mantequilla.*
1. Tanque de sosa
2. Bomba dosificadora
3. Equipo de mezcla
4. Célula de mantenimiento
5. Inyección de agua

La GLA, con frecuencia abrillantada para obtener el grado más alto posible de pureza en el "aceite crudo", se funde y se enfría a continuación lentamente hasta una temperatura calculada a la que fracción especificada cristaliza mientras que las fracciones con más bajos puntos de fusión permanecen líquidas. Los cristales se recogen con filtros especiales. El filtrado se enfría entonces hasta una temperatura más baja a la que otras fracciones cristalizan y son de nuevo recogidas, y así sucesivamente.

Decolesterolización

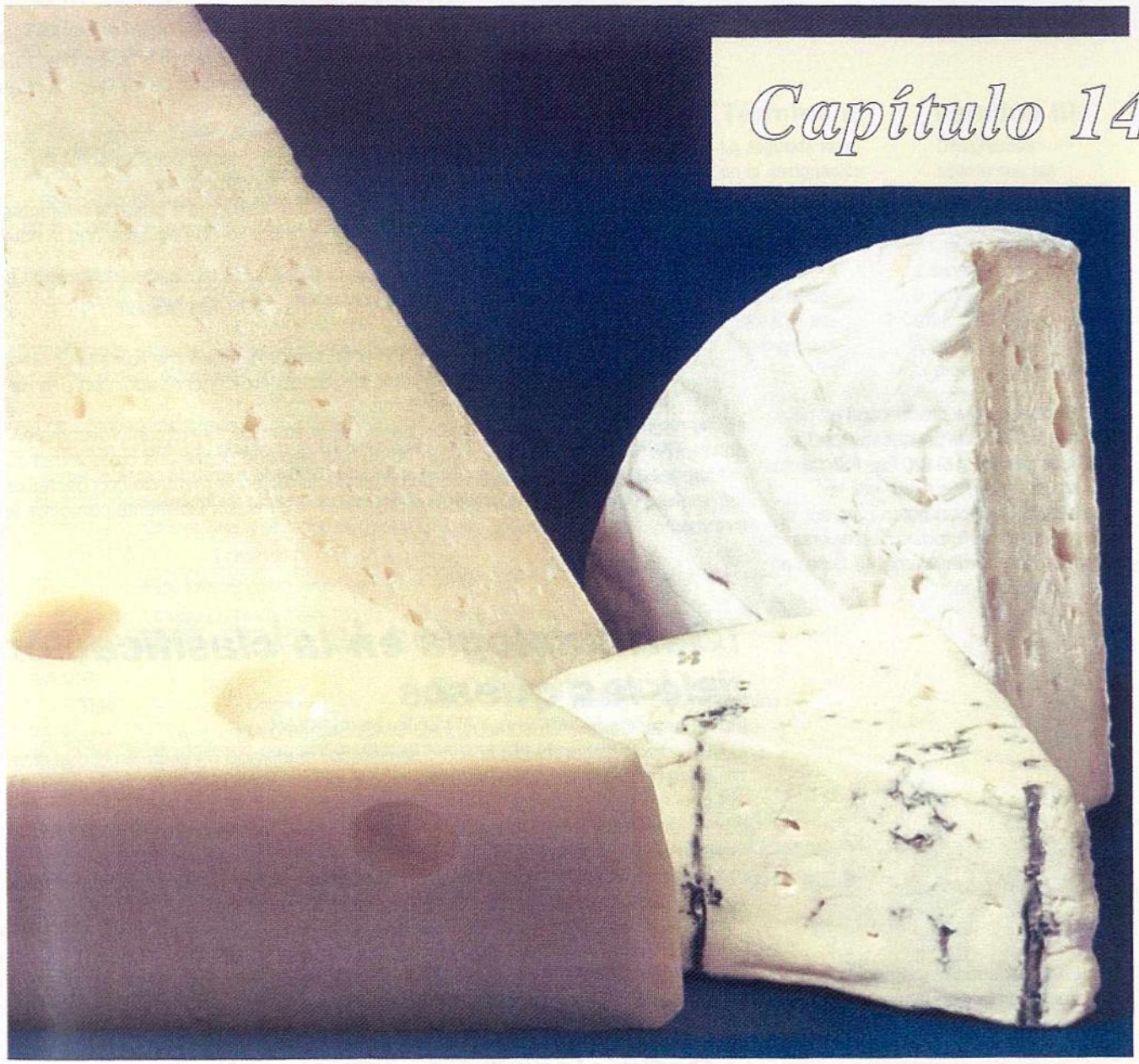
La decolesterolización es un proceso en el que se elimina el colesterol de la GLA.

Un método frecuentemente utilizado consiste en mezclar el aceite con almidón modificado, betaciclodextrina (BCD). La molécula de BCD rodea al colesterol y forma un precipitado que se puede separar por centrifugación.

Envasado

La GLA se llena en envases de varios tamaños. Para restauración y hostelería se suministran envases de 1 kg a 19.5 kg y para usos industriales se envasa en bidones de más de 185 kg.

Normalmente se inyecta primero en el envase un gas inerte, nitrógeno (N_2). Como el gas nitrógeno es más pesado que el aire se va hacia el fondo. Cuando se llena la GLA -que es más pesada que el nitrógeno- irá al fondo y el gas nitrógeno creará un recubrimiento protector que previene que la GLA sufra una oxidación inducida por el aire.



Capítulo 14

El queso

Tradición y conocimientos básicos

- **El queso se ha fabricado en muchas culturas desde la antigüedad.**
- **El queso es un concentrado lácteo, que consta principalmnete de sólidos como proteinas, caseina sobre todo, y grasa. El líquido residual se denomina lactosuero.**
- **Como regla fundamental, la caseina y la grasa de la leche se concentran aproximadamente 10 veces en la producción de queso duro y en algunos quesos semiduros.**
- **No es posible establecer una definición estricta del queso, ya que existen muchas variantes.**

- El contenido de humedad del queso sirve para distinguir distintas categorías, como las de queso duro (baja humedad), queso semiduro y queso blando. La norma FAO/OMS Standard No. A 6 da una clasificación de los quesos que es generalmente aceptada.
- Cada categoría se distingue por toda una serie de características, tales como estructura (textura, cuerpo), sabor y apariencia, que es consecuencia de los cultivos utilizados y de la técnica seguida en su elaboración.
- El queso fundido es un producto tratado térmicamente a base de diferentes tipos de queso con diferentes grados de maduración de acuerdo con la norma FAO/OMS Standard No. A 8 (b).
- El queso de lactosuero es un tipo de queso sobre todo fabricado en Noruega y Suecia y se define de acuerdo con la norma FAO/OMS Standard No. A 7 como sigue:

  Los quesos de lactosuero son productos obtenidos mediante la concentración de lactosuero y moldeado del lactosuero concentrado, con o sin la adición de leche y grasa láctea.

•El queso cremoso es un queso blando no madurado, brevemente descrito en la norma FAO/OMS Standard C 31 como el queso que posee una cremosidad suave, sabor ácido y aroma típico de un producto lácteo fermentado con bacterias formadoras de aromas y ácido láctico. Se unta y mezcla fácilmente con otros alimentos.

El queso más grande que se ha hecho ha sido un queso Cheddar que pesaba 15.190 kg. Fué fabricado en Enero de 1964 por la Wisconsin Foundation para ser exhibido en la Exposición Universal de Nueva York. Tardaron 43 horas en su fabricación.

Terminología en la clasificación de los quesos

(Fuente: Codex Alimentarius, FAO/OMS, Standard A6)
El queso es el producto sólido o semisólido, madurado o fresco, en el que el valor de la relación seroproteinas/caseina no supera al de la leche, y que es obtenido por:

- coagulación (total o parcial) de las siguientes materias primas: leche, leche desnatada, leche parcialmente desnatada, nata, nata de suero, o mazada, por medio de la acción del cuajo o de otros agentes coagulantes adecuados, y con un escurrido parcial del lactosuero resultante de esta coagulación; o
- técnicas de proceso que implican la coagulación de la leche y/o productos derivados de la leche que dan un producto final que tiene unas características físicas, químicas y organolépticas similares al producto englobado en la "Clasificación de los quesos".

En 1974 unos rusos encontraron un queso en la permanentemente helada tundra siberiana. Tenía al menos una antigüedad de 2.000 años y se dijo que era de una delicadeza incomparable.

Definiciones

1. *Queso curado o madurado* es el queso que no está listo para su consumo inmediatamente después de su fabricación, ya que se debe mantener durante un cierto tiempo, a una determinada temperatura, y bajo determinadas condiciones, para que se consigan obtener los cambios físicos y bioquímicos que caracterizan al queso.
2. *Queso madurado o curado con mohos* es un queso en el que el curado se realiza principalmente por medio del desarrollo de mohos característicos que crecen en el interior y/o en superficie del queso.
3. *Queso no curado, no madurado, o queso fresco* es el queso que está listo para su consumo inmediatamente después de su elaboración.

Clasificación de los quesos

La clasificación que se muestra en la Tabla 14.1 se aplica a todos los quesos comprendidos en esta norma. Sin embargo, esta clasificación no excluye la posibilidad de otros requerimientos más específicos que vendrían dados en normas concretas de determinados quesos.

Tabla 14.1
Clasificación de los quesos

Término I			Término II	Término III
Si la HBNG* es, %	**La primera fase en la designación debe ser**	**Si la GMS** es, %**	**La segunda fase en la designación debe ser**	**Designación acorde con las características principales de curado**
				1. Curado o madurado
<41	Extra duro	>60	Muy graso	a. sobre todo en superficie
49 - 56	Duro	45 - 60	Graso	b. sobre todo en el interior
54 - 63	Semiduro	25 - 45	Graso medio	2. Curado con mohos o madurado
61 - 69	Semiblando	10 - 25	Bajo en grasa	a. sobre todo en superficie
>67	Blando	<10	Sin grasa	b. sobre todo en el interior
				3. No curado o no madurado***

* HBNG es igual al contenido de humedad sobre base libre de grasa, es decir

$$\frac{\text{Peso de la humedad en el queso}}{\text{Peso total del queso - Peso de la grasa en el queso}} \times 100$$

** GMS es igual al contenido de grasa sobre base seca, es decir

$$\frac{\text{Contenido de grasa en el queso}}{\text{Peso total del queso - Peso de la grasa en el queso}} \times 100$$

*** La leche destinada a este tipo de queso será pasteurizada

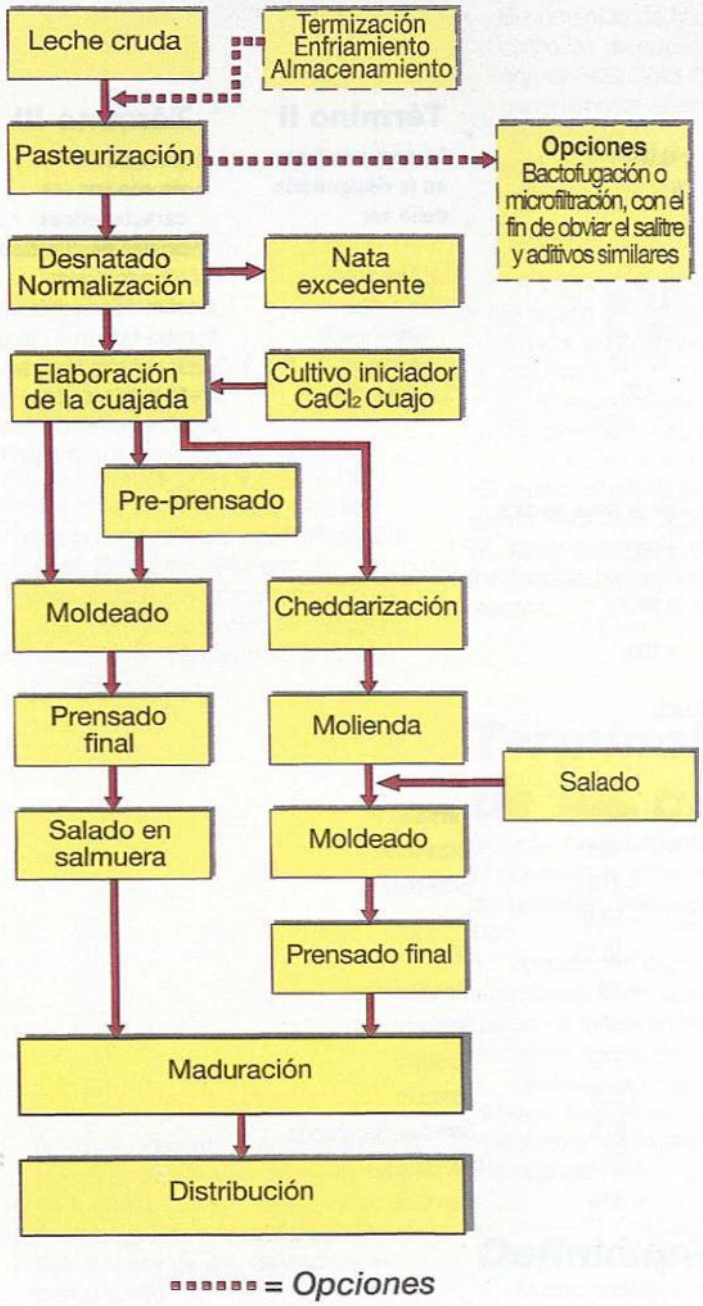
Ejemplos:

Tipo	Origen	GMS	HBNG	Término I
Parmesano	I	35+	≈ 40%	Extra duro
Grana	I	35+	≈ 41%	Extra duro
Emmenthal	CH	45+	≈ 52%	Duro
Gruyère	F	45+	≈ 52.5%	Duro
Cheddar	UK	50+	≈ 5%	Duro/Semiduro
Gouda	NL	45+	≈ 57%	Semiduro
Tilsiter	D	45+	≈ 57%	Semiduro
Havarti	DK	45+	≈ 59%	Semiduro
Queso azul	DK, F, E, etc.	50+	≈ 61%	Semiduro/Semiblando
Brie	F	45+	≈ 68%	Semiblando
Queso Cottage	USA	>10	< 69%	Blando

Fabricación del queso. Procedimientos generales de fabricación del queso duro y semiduro

La fabricación del queso implica cierto número de etapas fundamentales que son comunes a la mayoría de los tipos de queso. Existen también otros modos de tratamiento que son específicos de ciertas variedades. Las etapas principales de producción de queso duro y semiduro se ilustran esquemáticamente en el diagrama de bloques de la Figura 14.1.

La leche para fabricación del queso es pretratada, en ciertos casos premadurada tras la adición de un cultivo bacteriano apropiado al tipo de queso, y mezclada con el cuajo. La actividad enzimática del cuajo provoca que la leche coagule y pase a formar un gel sólido conocido como cuajada o coágulo. Este se corta con utensilios especiales de corte en pequeños cubos con tamaño adecuado -sobre todo para facilitar la expulsión del lactosuero. Durante el resto del proceso de elaboración de la cuajada las bacterias crecen y forman ácido láctico, y los granos de cuajada se someten a un tratamiento mecánico con utensilios de agitación, al mis-



Leche para queso

- Normalización en grasa
  - Grasa con relación a SNG (Caseína) = G/SNG (Caseína)
- Pasteurización
  - 70-72°C/15-20 s (no siempre empleada)
  - Enfriamiento hasta unos 30°C = temperatura de cuajado

Opciones

- Reducción mecánica de bacterias:
  - Bactofugación
  - Microfiltración

A partir de la leche para queso

- En la tina de cuajado
  - Acondicionamiento de la leche
    - Aditivos
      - Cloruro cálcico
      - Nitratos, si está permitido por la ley
      - Bacterias iniciadoras, apropiadas al tipo de queso
      - Cuajo como coagulante
- Coágulo
  - Cortado en granos (cuajada)
  - Calentamiento, escaldado, directamente o indirectamente, dependiendo del tipo de queso
  - Recogida de la cuajada para pre-prensado y/o moldeado/prensado final, si es necesario
  - Salado con salmuera
  - Cheddarización seguida de molienda, salado, moldado, y prensado, para queso Cheddar.
- Formado, prensado, y queso salado para almacenamiento en cámara de maduración durante el tiempo requerido.

Fig. 14.1 *Diagrama de flujo de los pasos del proceso de producción de queso duro y semiduro.*

mo tiempo que la cuajada se calienta según un programa de temperaturas preestablecido. El efecto combinado de estas tres acciones -crecimiento de bacterias, tratamiento mecánico y tratamiento térmico- da lugar a la sinéresis, es decir, a la separación del lactosuero de los granos de cuajada. La cuajada terminada se coloca en moldes metálicos, de madera o de plástico, que determinan la forma del queso terminado.

El queso se prensa, aprovechando su propio peso o aplicando presión a los moldes, que es lo más común. El tratamiento durante la elaboración de la cuajada y el prensado determinan las características del queso.

El diagrama de flujo del proceso de la Figura 14.1 muestra también que se realizan las operaciones de salado y almacenamiento. Finalmente, el queso se recubre, se envuelve o se envasa.

Tratamientos previos de la leche

La validez de la leche como materia prima para la elaboración de queso viene determinada en gran medida por las condiciones de producción y ordeño en la granja. Además de las necesidades generales de estrictas condiciones de higiene, *la leche procedente de vacas enfermas o animales que estén sufriendo un tratamien-*

to con antibióticos no se debe utilizar en la fabricación de queso ni de ningún otro producto lácteo.

La alimentación de los animales a base de ensilados mal preparados puede afectar de manera adversa la calidad de distintas variedades de queso.

La leche de vacas enfermas o animales que sufren tratamiento con antibióticos no se debe utilizar para la fabricación de queso, o cualquier otro producto lácteo.

Recogida de la leche

Con el método clásico de recepción de la leche, es decir, con el suministro de leche en cántaras a la fábrica en el transcurso de pocas horas, durante la mañana, de toda la leche necesaria para la producción del dia, la leche era tratada casi inmediatamente después de su pesado. El contenido de grasa era entonces normalizado junto con el desnatado y la pasteurización y, tras el enfriamiento regenerativo hasta la temperatura de cuajado, la leche se bombeaba hasta las tinas de cuajado.

La práctica de recogida de la leche de las granjas a intervalos de dos o incluso tres días se ha convertido cada vez en más habitual. Esto quiere decir que se ha de demandar especialmente que la leche sea tratada por los productores y los conductores de cisternas, que han de tener la autoridad suficiente para rechazar la leche que esté ligeramente afectada y/o deteriorada por malos olores. La *mastitis bovina* es una enfermedad común que causa sufrimiento a la vaca y afecta drásticamente la composición de la leche. Los granjeros deben descartar esta leche, o al menos no enviarla a la fábrica de queso.

Tratamiento térmico y reducción mecánica del número de bacterias.

Termización

Cuando se introdujo la recogida de la leche en días alternados, los fabricantes de queso que tenían que utilizar esa leche notaban que la calidad se deterioraba con frecuencia. Esta tendencia era especialmente notable cuando la leche tenía que ser almacenada hasta el día siguiente después de su recepción, incluso cuando se enfriaba hasta 4°C durante el transporte por carretera en cisternas hasta el tanque de almacenamiento. Se podían tener mayores tiempos de almacenamiento cuando los días laborables de la semana se reducían a seis o incluso cinco días.

Termización
Es un tratamiento térmico moderado a 65°C durante 15 s que a menudo se aplica a la leche para fabricación de queso.

Durante el almacenamiento refrigerado, las proteinas de la leche y las sales minerales cambian su caracter, que tiende a deteriorar su aptitud para la fabricación de queso. Se ha demostrado que precipita alrededor del 25% del cálcio como fosfato tras 24 horas de almacenamiento a +5°C. Esta reducción, sin embargo, es temporal. Cuando la leche se pasteuriza el calcio se redisuelve y las propiedades de coagulación de la leche son restauradas casi completamente. La β-caseina también abandona el complejo sistema de la micela de caseina durante el almacenamiento refrigerado, lo que posteriormente contribuye a que se reduzcan sus propiedades queseras. Sin embargo, esta reducción también se restaura casi completamente mediante la pasteurización.

Otro fenómeno igualmente importante es que la microflora introducida en la leche por recontaminación -especialmente de *Pseudomonas spp*- se adaptará a la baja temperatura, de forma que sus enzimas, proteasas y lipasas, descompondrán las grasas y las proteinas respectivamente. El resultado de estas acciones es un sabor "amargo" que procede de la descomposición de la β-caseina que ha dejado la micela de caseina durante el almacenamiento a baja temperatura.

Los enzimas proteolíticos y lipolíticos formados por *Pseudomonas* pueden también cooperar en la penetración de las membranas de los glóbulos de grasa. Esta cooperación simbiótica da lugar a la liberación de ácidos grasos, especialmente los de más bajo peso molecular, por medio de la acción lipasa, comunicando a la leche un sabor rancio.

Fig. 14.2 *Instalación de recepción de la leche para queso.*
1. Eliminador de aire
2. Filtro
3. Caudalímetro de leche
4. Tanque de almacenamiento intermedio
5. Termización y enfriamiento o sólo enfriamiento
6. Tanque silo

La pasteurización regular HTST a 72-73°C durante 15-20 segundos es la más comunmente aplicada.

Por lo anterior si la leche que está lista hace 24-48 horas no puede ser procesada dentro de las 12 horas siguientes a su recepción a la fábrica, es aconsejable que se enfríe hasta unos +4°C, o, mejor, que se termice.

La termización implica un tratamiento térmico moderado, a 65°C durante 15 segundos, seguido de un enfriamiento a +4°C tras el cual la leche es todavía fosfatasa positiva. Esta técnica se introdujo básicamente con el fin de detener el crecimiento de la flora psicrotrófica cuando la leche se almacena durante 12-48 horas tras su llegada a la fábrica. Tal como se ha dicho en el Capítulo 1, la "edad crítica"de la leche cruda mantenida a +4°C normalmente está entre 48 y 72 horas tras el ordeño. Ver también la Figura 1.13 del Capítulo 1. La Figura 14.2 muestra la disposición de una estación de recepción de leche.

Pasteurización

Antes de que comience la fabricación de queso, la leche normalmente sufre un pretratamiento pensado para conseguir las condiciones óptimas de fabricación.

La leche destinada a la fabricación de determinados tipos de queso que necesitan más de un mes de maduración no tiene por qué pasteurizarse, pero usualmente se pasteuriza.

En la Tabla 14.1 se puede ver que la leche destinada a la fabricación de queso no madurado (queso fresco) se debe pasteurizar. Esto implica que la leche destinada a la fabricación de quesos que necesitan un periodo de maduración de al menos un mes no necesita pasteurizarse.

Sin embargo, e lactosuero que se utiliza en alimentación animal se debe pasteurizar para prevenir la propagación de enfermedades bovinas. Pero, si la leche destinada a la fabricación de queso se pasteuriza no será necesario pasteurizar el lactosuero obtenido.

La leche destinada a la fabricación de los quesos Emmenthal, Parmesano y Grana, que son tipos de queso extraduro, no se debe calentar a más de 40°C, para evitar que se vea afectado el aroma, el sabor y la expulsión del lactosuero. La leche para estos tipos de queso normalmente procede de granjas seleccionadas con una inspección veterinaria frecuente del rebaño.

Aunque se cree que el queso hecho con leche no pasteurizada tiene un mejor aroma y sabor, la mayoría de los fabricantes (excepto los fabricantes de quesos extraduros) pasteurizan la leche para evitar el riesgo que supone no pasteurizarla, aunque su calidad se vea afectada.

La pasteurización debe ser suficiente para matar las bacterias capaces de afectar la calidad del queso, como las *Coliformes*, que pueden causar fácilmente el "hinchado" y un sabor desagradable.

La pasteurización HTST a 72-73°C durante 15-20 segundos es el tratamiento más comúnmente aplicado.

Sin embargo, los microorganismos formadores de esporas en estado de esporas sobreviven a la pasteurización y pueden causar serios problemas durante el proceso de maduración. Un ejemplo es el *Clostridium tyrobutyricum*, que forma ácido butírico y grandes volúmenes de gas hidrógeno por fermentación del ácido láctico. Este gas destruye completamente la textura del queso, sin contar el hecho de que el ácido butírico tiene un olor desagradable.

Un tratamiento térmico más intenso podría reducir este riesgo en particular, pero podría también deteriorar las propiedades queseras generales de la leche. Por ésto se utilizan otros medios para reducir las bacterias termorresistentes.

Tradicionalmente, se han añadido a la leche ciertos agentes químicos antes de la fabricación de queso para prevenir el "hinchado" y el desarrollo de sabores indeseados causados por las bacterias formadoras de esporas termorresistentes (principalmente *Clostridium tyrobutyricum*). El agente químico más frecuentemente utilizado es el nitrato sódico (NO_3Na), aunque en la producción de queso Emmenthal se utiliza también el peróxido de hidrógeno (H_2O_2). Sin embargo, como el uso de aditivos químicos ha sido ampliamente criticado, se han adoptado medios mecánicos de reducción del número de microorganismos, particularmente en paises donde el uso de inhibidores químicos está prohibido.

Reducción mecánica del número de bacterias

Bactofugación

Tal como se ha discutido en el Capítulo 6.2, la bactofugación es un proceso en el que se utiliza una centrífuga hermética especialmente diseñada, la Bactofugadora®,

para separar de la leche las bacterias, y especialmente las esporas formadas por cepas de bacterias específicas.

La bactofugación ha demostrado ser una eficiente manera de reducir el número de esporas en la leche, ya que su peso específico es más alto que el de la leche.

La bactofugación normalmente separa la leche en una fracción que está más o menos libre de bacterias y un concentrado (bactofugado) que contiene las bacterias y esporas en general, que supone cantidades de hasta el 3% del caudal entrante a la Bactofugadora.

La bactofugación de la leche es siempre una parte del conjunto de pretratamientos de la leche. En las aplicaciones donde el objetivo es conseguir leche de calidad para producción de queso y leche en polvo, la Bactofugadora se instala en serie con la separadora centrífuga, antes o después de ésta.

Cuando la calidad del excedente de nata producida mediante normalización directa en continuo de la grasa es una aspecto importante, la Bactofugadora debe instalarse aguas arriba de la separadora centrífuga. De esta manera la calidad de la nata se mejora al mismo tiempo que se reduce la carga de esporas de aerobios formadores de esporas, como el *Bacillus cereus*.

Normalmente se elige la misma temperatura para la bactofugación y el desnatado, por ejemplo 55-65ºC o también 60-63ºC.

Existen dos tipos de Bactofugadoras:

- Bactofugadora de dos fases
- Bactofugadora de una fase

La Bactofugadora de dos fases tiene dos salidas en la parte superior:

- una para la descarga continua de la fase pesada (bactofugado) a través de un disco superior especial, y
- una para la fase reducida en bacterias.

La Bactofugadora de una fase tiene sólo una salida en la parte superior del rotor, para la leche reducida en bacterias. El bactofugado se recoge en la cámara de lodos del rotor y se descarga a intervalos preestablecidos a través de puertas situadas en el cuerpo del rotor.

Estas dos combinaciones hacen posible la elección de diferentes combinaciones de equipos para optimizar el estado bacteriológico de la leche usada tanto en fabricación de queso como en otros productos lácteos.

En este contexto se ha de decir que el lactosuero, si se destina a la fabricación de concentrados proteicos de lactosuero como ingrediente en alimentos infantiles, se ha de bactofugar tras la recuperación de finos y de la grasa.

Alternativas de proceso

Existen alrededor de diez maneras posibles de configurar una planta de bactofugación. Tres ejemplos serían:

1. Bactofugadora de dos fases con descarga continua de bactofugado
2. Bactofugadora de una fase con descarga intermitente de bactofugado
3. Bactofugación doble, con dos Bactofugadoras de una fase en serie.

1. Bactofugadora de dos fases con descarga continua de bactofugado. Este diseño, que se muestra en la Figura 14.3, trabaja en condiciones herméticas frente al aire y produce un flujo continuo de concentrado (bactofugado) de bacterias libre de aire como fase pesada. Esta fase que supone hasta el 3% del caudal entrante (que se ajusta por medio de una bomba externa de rotor lobulado con control de velocidad variable) normalmente se esteriliza y se vuelve a mezclar con la corriente principal. El esterilizador es del tipo de infusión, y la temperatura de es-

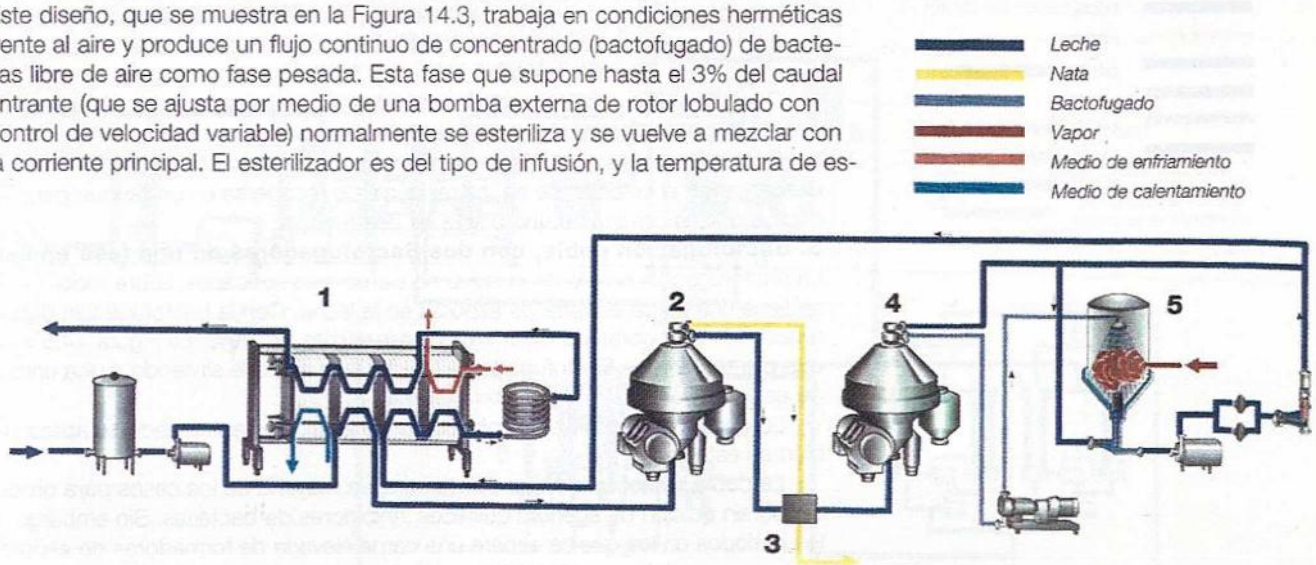


Fig. 14.3 *Bactofugación con descarga continua y esterilización del bactofugado.*
1. Pasteurizador
2. Separadora centrífuga
3. Sistema automático de normalización
4. Bactofugadora de dos fases
5. Esterilizador de infusión

terilización es aproximadamente de 130°C, que se aplica durante unos pocos segundos, y es suficiente para inactivar las esporas de los microorganismos *Clostridium*. El bactofugado caliente que sale del esterilizador se mezcla con aproximadamente la mitad del volumen de la leche bactofugada para bajar la temperatura antes de que sea reintroducida en el resto del caudal de bactofugado. Después de la mezcla la leche se envía al pasteurizador para ser tratada a 72°C durante 15 segundos, y a continuación sufre los enfriamientos regenerativo y final hasta la temperatura de cuajado.

La Bactofugadora con descarga continua de bactofugado se utiliza en aplicaciones donde:

-sea posible la remezcla de bactofugado esterilizado,

-exista un uso alternativo para el bactofugado en un producto donde el tratamiento térmico sea suficientemente fuerte para inactivar los microorganismos.

Las capacidades horarias nominales son de 15000 l y 25000 l (dos tamaños de centrífuga), que empíricamente consiguen al menos un 98% de reducción de esporas anaerobias.

2. Bactofugadora de una fase con descarga intermitente de bactofugado. Para conseguir el mismo efecto de reducción que se ha mencionado antes, se recomiendan unas capacidades nominales de 15000 l/h y 25000 l/h. El bactofugado procedente de una Bactofugadora de una fase es descargado intermitentemente a través de puertas situadas en el cuerpo del rotor a intervalos preestablecidos de 15-20 minutos, lo que significa que el bactofugado será más bien concentrado, por lo que tendrá un menor volumen, del orden del 0.15-0.2% del producto

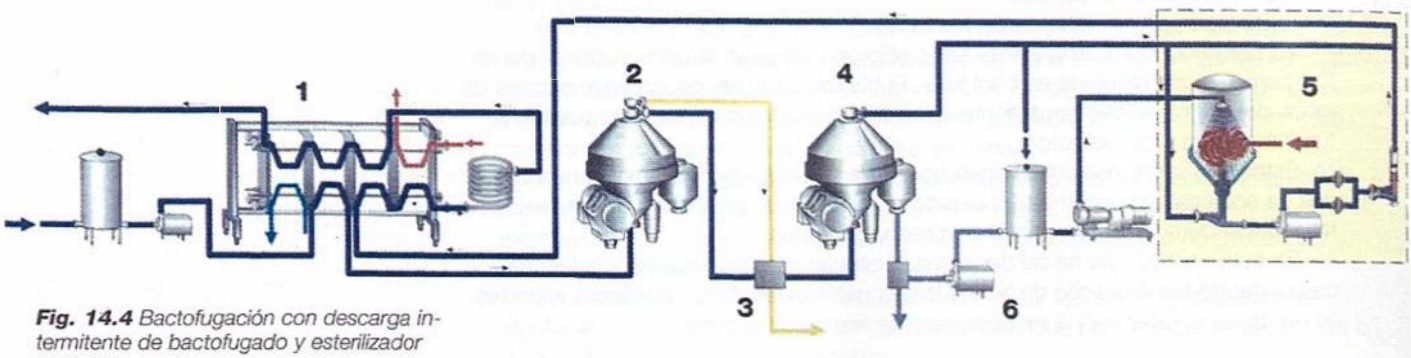


Fig. 14.4 *Bactofugación con descarga intermitente de bactofugado y esterilizador opcional.*
1. Pasteurizador
2. Separadora centrífuga
3. Sistema automático de normalización
4. Bactofugadora de una fase
5. Esterilizador de infusión
6. Bomba de descarga

entrante. Cuando el bactofugado se va a reintroducir en la leche para la fabricación del queso, se ha de esterilizar. Esto se ilustra en la Figura 14.4, que también muestra que antes de bombearse al esterilizador de infusión el concentrado se diluye con leche bactofugada, con un 1.8% del producto entrante, para obtener suficiente volumen y realizar adecuadamente la esterilización. El arranque y la parada de la bomba de descarga (6) está ligado al modo de operación del sistema de descarga de la Bactofugadora.

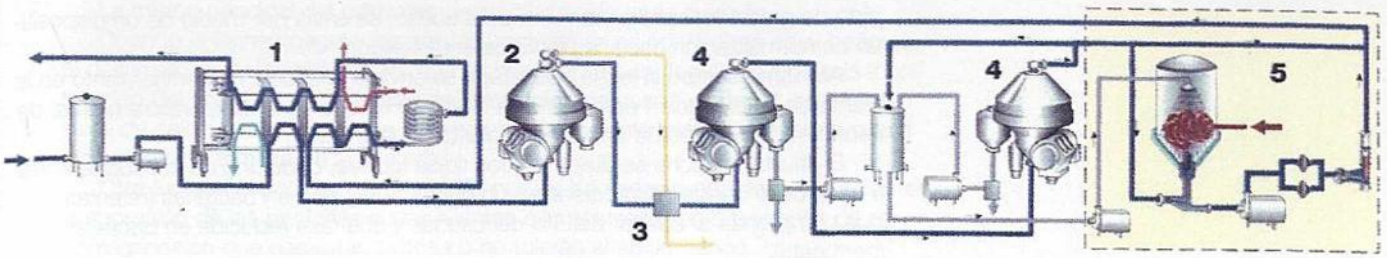
Conforme deja el esterilizador el bactofugado caliente se enfría al mezclarse con leche bactofugada, alrededor del 50% del producto entrante.

Cuando la legislación no permite la reutilización del bactofugado, se puede descargar en el colector de aguas residuales o recogerse en un tanque para productos que se enviarán a una planta de destrucción.

3. Bactofugación doble, con dos Bactofugadoras de una fase en serie. La bactofugación simple de la leche no siempre es suficiente, sobre todo cuando se tiene una carga elevada de esporas en la leche. Con la bactofugación doble, la reducción de esporas de *Clostridium* alcanza más del 99%. La Figura 14.5 ilustra una planta con dos Bactofugadoras de una fase en serie sirviendo a una unidad de esterilización.

Lo que se ha dicho antes sobre el tratamiento del bactofugado se aplica también en este caso.

La doble bactofugación es suficiente en la mayoría de los casos para producir queso sin adición de agentes químicos inhibidores de bacterias. Sin embargo, en los períodos en los que se espere una carga elevada de formadoras de esporas,



se pueden usar pequeñas cantidades de aditivos químicos, del orden de 2.5 g/100 l de leche, para conseguir una seguridad total, si la ley lo permite.

Si no se utiliza ningún medio mecánico de reducción de esporas es normal añadir unos 15-20 g de nitrato sódico por cada 100 l de leche para inhibir su crecimiento, pero con la simple bactofugación y una elevada carga de esporas en la leche, 2.5-5 g por cada 100 l de leche será suficiente para prevenir el crecimiento de las esporas supervivientes.

Fig. 14.5 *Bactofugación doble con esterilizador opcional.*
1. Pasteurizador
2. Separadora centrífuga
3. Sistema automático de normalización
4. Bactofugadora de una fase
5. Esterilizador de infusión, opción

Microfiltración

Se sabe desde hace mucho tiempo que un filtro de membrana con un tamaño de poro de aproximadamente 0.2 micras puede separar las bacterias de una solución acuosa.

En la microfiltración de la leche, el problema es que la mayoría de los glóbulos de grasa y parte de las proteinas son tan grandes o más que las bacterias. Esto da lugar a que el filtro se colmate muy rápidamente cuando se utilizan membranas con un tamaño de poro tan pequeño. Por lo anterior será la leche desnatada la que se pase por este filtro, mientras que la nata que se necesita para la normalización del contenido en grasa de la leche se esterilizará, normalmente junto con el concentrado de bacterias obtenido por la microfiltración que se lleva a cabo simultáneamente. El principio de la microfiltración se discute en el Capítulo 6.4, Filtros de membrana.

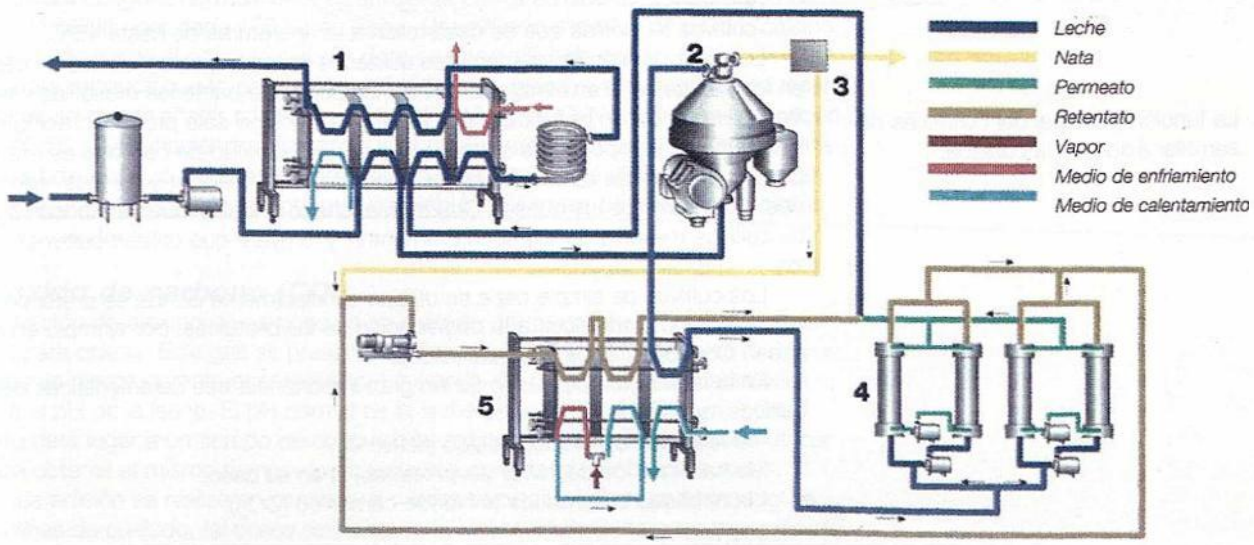
En la práctica, se eligen las membranas con un tamaño de poro de 0.8 a 1.4 micras para bajar la concentración de proteinas. Además, las proteinas forman una membrana dinámica que contribuye a la retención de los microorganismos.

La microfiltración debe incluir una unidad de esterilización indirecta para la esterilización combinada de un volumen adecuado de nata para la normalización de la grasa y de retentato de la unidad de filtración.

La Figura 14.6 muestra una planta de tratamiento de leche con microfiltración. La planta de microfiltración está provista de dos circuitos trabajando en paralelo. Cada circuito puede manejar hasta 5000 l/h de leche desnatada, lo que significa que esta planta tiene una capacidad de trabajo de aproximadamente 10000 l/h. De esta forma se puede aumentar la capacidad añadiendo circuitos.

La leche cruda entra en la planta y se precalienta hasta la temperatura adecuada de separación, normalmente de 60-63°C, a la que se separa en leche desnatada y nata. Una cantidad predeterminada de nata, suficiente para obtener el conte-

Fig. 14.6 *Tratamiento de la leche que incluye microfiltración de doble circuito y esterilización del concentrado de bacterias junto con la nata necesaria para la normalización en grasa de la leche para la fabricación del queso.*
1. Pasteurizador
2. Separadora centrífuga
3. Sistema automático de normalización
4. Planta de microfiltración de doble circuito
5. Planta de esterilización



nido de grasa deseado en la leche para queso, se envía por medio de un dispositivo de normalización hacia la planta de esterilización.

Al mismo tiempo la leche desnatada se envía a la sección de enfriamiento en la planta de esterilización para enfrarse hasta 50°C, que es la temperatura normal de microfiltración, antes de entrar en la planta de filtración.

El caudal de leche se divide en dos flujos iguales, cada uno de los cuales entra a un circuito donde se fracciona en un concentrado rico en bacterias (retentato), que comprende alrededor del 5% del caudal, y una fase reducida en bacterias (permeato).

Los retentatos de ambos circuitos se juntan a continuación y se mezclan con la nata que se utilizará en la normalización antes de entrar en el esterilizador. Después de la esterilización a 120-130°C durante unos pocos segundos, la mezcla se enfría hasta unos 70°C artes de remezclarse con el permeato. A continuación el caudal total se pasteuriza a 70-72°C durante unos 15 segundos y se enfría hasta la temperatura de cuajadc, normalmente 30°C.

Debido a la alta eficiencia en la reducción de bacterias, la microfiltración permite la producción de queso duro y semiduro sin ninguna necesidad de aditivos químicos para inhibir el crecimiento de las esporas de *Clostridium*.

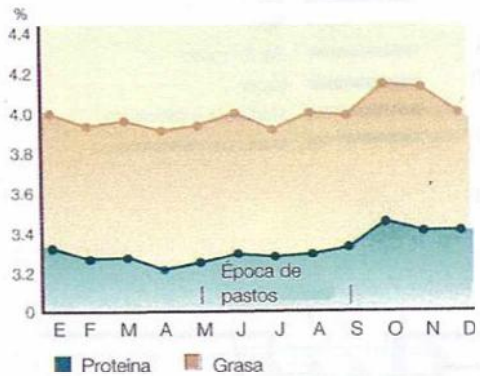


Fig. 14.7 *Ejemplo de variación estacional de las proteínas de la leche y del contenido en grasa (Valores medios para 1966-1971, Suecia).*

Normalización

Los tipos de quesos se clasifican a menudo según el contenido en grasa referido a materia seca (GMS). Por ello, el contenido en grasa de la leche para queso debe ser ajustado convenientemente. Por esta razón, a lo largo del año se deben medir los contenidos de proteina y grasa de la leche cruda y se han de normalizar y ajustar al valor requerido. La Figura 14.7 muestra un ejemplo de cómo el contenido en grasa y caseina de la leche puede variar durante un año (son valores medios de medidas realizadas en Suecia durante un periodo de 5 años, de 1966 a 1971).

La normalización puede realizarse por remezcla en continuo después de la desnatadora, o bien por mezcla de leche entera con leche desnatada en depósitos seguida de la pasteurización.

Aditivos en la leche para fabricación de queso

Los aditivos esenciales en el proceso de fabricación de queso son los fermentos y el cuajo. En ciertas condiciones puede ser también necesario suministrar otros componentes tales como cloruro cálcico (Cl Ca) y nitratos (NO_3K o NO_3Na). Un enzima, la *lisozima*, se ha introducido también para sustituir al nitrato como inhibidor de los organismos *Clostridium*. Un intento interesante de mejora de las propiedades queseras es la introducción de dióxido de carbono (CO_2) en la leche para queso.

Fermentos

El cultivo iniciador o fermento es un factor muy importante en la fabricación de queso. Lleva a cabo varias funciones.

Los dos principales tipos de cultivo que se utilizan en fabricación de queso son:

-cultivos mesófilos con una temperatura óptima comprendida entre 20 y 40°C y

-cultivos termófilos que se desarrollan a temperaturas de hasta 45°C.

Los cultivos más frecuentemente utilizados son a base de mezclas de cepas, en los que se tiene en simbiosis dos o más cepas de bacterias mesófilas y termófilas, obteniendo un beneficio mutuo. Estos cultivos no sólo producen ácido láctico sino también componentes aromáticos y CO_2. El dióxido de carbono es esencial para la creación de cavidades en los tipos de queso granular y de ojos redondeados. Son ejemplos los quesos Gouda, Manchego y Tilsiter que se fabrican a partir de cultivos mesófilos, y los tipos Emmenthal y Gruyère que utilizan cultivos termófilos.

La función principal del cultivo es desarrollar ácido en la cuajada.

Los cultivos de simple cepa se utilizan principalmente donde se pretende desarrollar ácido y contribuir a la degradación de las proteinas, por ejemplo en el queso Cheddar y otros tipos parecidos.

En la fabricación de queso tienen gran importancia tres características de los cultivos, que son:

- la habilidad de producir ácido láctico
- la habilidad de degradar las proteinas, y, en su caso,
- la habilidad de producir anhídrido carbónico (CO_2).

La misión principal del cultivo es desarrollar ácido en la cuajada.

Cuando la leche coagula, las células bacterianas se concentran en el coágulo. El desarrollo de ácido baja el pH, que es importante para facilitar la sinéresis (contracción del coágulo acompañada de eliminación de suero). Además, se eliminan sales de calcio y fósforo, lo que influye sobre la consistencia del queso y ayuda a incrementar la firmeza de la cuajada.

Otra función importante desarrollada por las bacterias productoras de ácido es la supresión de las bacterias supervivientes a la pasterización o bacterias de recontaminación que necesitan lactosa o no toleran el ácido láctico.

La producción de ácido láctico se detiene cuando toda la lactosa del queso ha sido fermentada (excepto en quesos blandos). La fermentación del ácido láctico es normalmente un proceso relativamente rápido. En algunos tipos de queso, como el Cheddar, se debe completar antes de que el queso se prense, y en otros tipos dentro de una semana.

Si el cultivo también contiene bacterias formadoras de CO_2, la acidificación de la cuajada viene acompañada de producción de dióxido de carbono a través de la acción de las bacterias que fermentan el ácido cítrico. Los cultivos mezcla de cepas con habilidad de desarrollar CO_2 son esenciales para la producción de queso de textura con ojos o huecos redondeados, o de formas irregulares. El gas implicado está inicialmente disuelto en la fase húmeda del queso. Cuando la solución llega a estar saturada el gas se desprende y forma los ojos.

El proceso de maduración en los quesos duros y ciertos tipos de semiduros es un proceso proteolítico combinado donde los enzimas originales de la leche y los de las bacterias del cultivo, junto con la enzima cuajo, provocan la descomposición de la proteina.

Fallos de los cultivos

A veces pueden ocurrir fallos en la producción de ácido láctico o puede producirse una baja acidificación.

Una de las causas más comunes es la presencia de antibióticos usados en el tratamiento de enfermedades de la ubre.

Otra posible causa es la presencia de bacteriófagos, virus termorresistentes que se encuentran en el aire y en el suelo.

La acción perjudicial de ambos fenómenos se discutió en el Capítulo 10, Preparación de cultivos y starters.

Una tercera causa de fallos es la presencia de agentes detergentes y esterilizantes utilizados en la industria en operaciones de limpieza y desinfección. La falta de cuidado, especialmente en el uso de desinfectantes, es una causa frecuente de fallos del cultivo.

Las perturbaciones en forma de acidificación lenta o fallo en la producción de ácido láctico puede depender de:

- Antibióticos
- Bacteriófagos
- Residuos de detergentes

Cloruro cálcico (Cl_2Ca)

Si la leche utilizada es de pobre aptitud para la fabricación de queso, el coágulo formado será blando. Ello da lugar a grandes pérdidas de finos (partículas de caseina), asi como de grasa, además de una sinéresis inadecuada durante el proceso de fabricación de queso.

Para conseguir un tiempo de coagulación constante y obtener una firmeza suficiente del coágulo, normalmente es suficiente con la adición de 5-20 gramos de cloruro cálcico por cada 100 kg de leche. Una adición excesiva de cloruro cálcico puede hacer que el coágulo sea tan duro que sea difícil de cortar.

Para producir queso con un bajo contenido en grasa, y si está permitido legalmente, se puede añadir a la leche el fosfato disódico (PO_4Na_2), en una proporción de 10-20 g/kg, añadiéndose antes que el cloruro cálcico. Esto incrementa la elasticidad del coágulo debido a la formación de fosfato cálcico ($(PO_4)_2Ca_3$) coloidal que tendrá casi el mismo efecto que los glóbulos de grasa de la leche atrapados en la cuajada.

Dióxido de carbono (CO_2)

La adición de dióxido de carbono es un método de mejora de la calidad de la leche para queso. Este gas se presenta de forma natural en la leche, pero la mayor parte se pierde durante el procesado. La adición de CO_2 por medios artificiales baja el pH de la leche. El pH normal de la leche se reduce 0.1 a 0.3 unidades. Esto dará lugar a un tiempo de coagulación más corto. El efecto se puede utilizar para obtener el mismo tiempo de coagulación con menor cantidad de cuajo.

La adición se realiza en continuo al mismo tiempo que se hace el llenado de las tinas de cuajado, tal como se indica en la Figura 14.8. El ritmo de inyección del

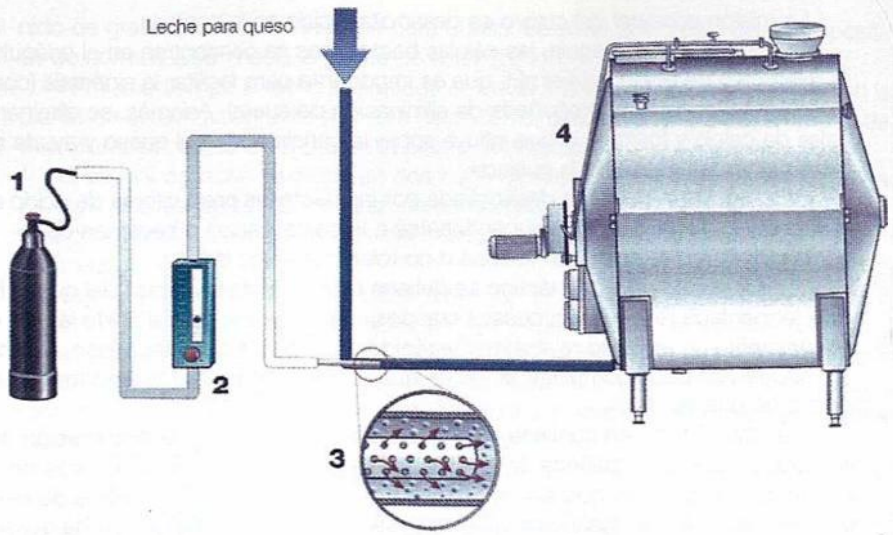


Fig. 14.8 *Adición de CO_2 gas a la leche para queso.*
1. *Botella de gas (o batería de 12 botellas o un tanque de almacenamiento de gas líquido con vaporizador).*
2. *Caudalímetro*
3. *Tubería perforada de inyección*
4. *Tanque de leche para queso*

gas CO_2, y el tiempo de contacto con la leche antes de su mezcla con el cuajo, se debe calcular cuando se instale el sistema. Los fabricantes que utilizan el dióxido de carbono han comprobado que el consumo de cuajo se puede reducir a la mitad sin resultados negativos para el proceso.

Nitrato potásico o sódico

Se pueden producir problemas durante la fermentación, como ya se ha indicado anteriormente, si la leche contiene bacterias acidobutíricas (*Clostridium*) y/o *Coliformes*. Entonces se pueden utilizar los nitratos de potasio o sodio para contrarrestar el efecto de estas bacterias, pero su dosis debe determinarse de forma precisa con referencia a la composición de la leche, el proceso para cada tipo de queso, etc., ya que si se excede la dosis se inhibe también el crecimiento de los fermentos lácticos. Una sobredosis (de nitrato sódico o potásico) puede afectar a la maduración del queso o incluso detenerla.

El salitre a dosis elevadas puede producir decoloración del queso, formando unas rayas rojizas y un sabor anormal. La dosis máxima permitida es de unos 30 g de salitre por cada 100 kg de leche.

En la década pasada el uso de los nitratos ha sido cuestionado desde el punto de vista médico, y en algunos paises se ha prohibido.

Si la leche se trata en una planta de bactofugación o microfiltración, las necesidades de nitrato pueden ser reducidas de forma radical o incluso eliminadas. Esta es una ventaja muy importante, por lo que un número cada vez mayor de paises están prohibiendo la utilización de nitratos.

Agentes colorantes

El color del queso viene determinado en gran parte por el color de la grasa de la leche, por lo que sufre variaciones estacionales. Los colorantes tales como la *carotina* y la *orleana*, que es un tinte, son utilizados para corregir esas variaciones estacionales en paises donde se permite la adición de estos agentes colorantes.

El *verde clorofila* (tinte de contraste) se utiliza también, por ejemplo para los quesos azules-veteados, para obtener un color pálido como contraste con el moho azul.

Cuajo

Excepto en los tipos de queso fresco tales como el queso cottage y quarg, en los que la leche se coagula principalmente mediante ácido láctico, toda la fabricación del queso depende de la formación de la cuajada por acción del cuajo o enzimas similares.

La coagulación de la caseina es el proceso fundamental en la fabricación de queso. Se hace generalmente con cuajo, pero se pueden utilizar otros enzimas proteolíticos, así como por acidificación de la caseina hasta el punto isoeléctrico (pH 4.6 - 4.7).

El principio activo del cuajo es un enzima denominada *quimosina*, de forma que la coagulación tiene lugar muy pronto después de la adición del cuajo a la leche. Existen varias teorías acerca del mecanismo del proceso, e incluso hoy no se

conoce totalmente. Es evidente que el proceso opera en varias etapas, que se distinguen habitualmente como sigue:

- Conversión de la caseina en paracaseina por la acción del cuajo.
- Precipitación de la paracaseina en presencia de iones de calcio.

El proceso global es gobernado por, entre otros factores, la temperatura, acidez y contenido de calcio de la leche. La temperatura óptima para el cuajo está en la región de los 40°C, aunque normalmente en la práctica se utilizan temperaturas más bajas, básicamente para evitar una dureza excesiva del coágulo.

El cuajo se extrae de los estómagos de los jóvenes terneros y se comercializa en forma de solución líquida con una fuerza usual de 1:10.000 a 1:15.000, lo que significa que una parte de cuajo puede coagular 10.000-15.000 partes de leche en 40 minutos a 35°C. Se puede utilizar también cuajo bovino y porcino, frecuentemente en combinación con cuajo de ternero (50:50, 30:70, etc.). El cuajo en la forma de polvo es normalmente 10 veces más fuerte que el cuajo líquido.

Sustitutos del cuajo animal

Hace unos 50 años se iniciaron unas investigaciones para encontrar sustitutos del cuajo animal. Se hicieron inicialmente en la India y en Israel ya que los vegetarianos reusan aceptar el queso hecho con cuajo animal. En el mundo Islámico el uso de cuajo porcino tampoco es aceptado, lo que es una razón importante para tratar de encontrar sustitutos adecuados. El interés en estos productos sustitutos ha crecido más ampliamente en los últimos años debido a la escasez de cuajo animal de buena calidad.

Existen dos tipos principales de coagulantes sustitutos:

- Enzimas coagulantes de origen vegetal.
- Enzimas coagulantes de origen microbiano.

Unas investigaciones han demostrado que la habilidad de coagular es generalmente buena cuando se utilizan preparados a base de enzimas vegetales. Una desventaja es que muy a menudo el queso desarrolla un gusto amargo durante el almacenamiento.

Se han investigado diferentes tipos de bacterias y mohos. Los enzimas coagulantes producidos son conocidos con diferentes marcas comerciales.

En los últimos años se ha utilizado la tecnología del ADN, de tal manera que actualmente se está probando un cuajo de ADN con características idénticas a las del cuajo de ternero.

Otros sistemas enzimáticos

Varias instituciones de investigación están trabajando en el aislamiento de sistemas enzimáticos que puedan ser utilizados en la aceleración del envejecimiento del queso. La técnica no está aún totalmentre desarrollada, y además no es de uso común.

Es importante, sin embargo, que estos bio-sistemas sean cuidadosamente probados y eventualmente aprobados por las autoridades competentes.

Tipos de fabricación del queso

Los distintos tipos de quesos son fabricados según diferentes etapas que se han establecido de acuerdo con unos principios que han sido trabajados durante muchos años de experimentación. Cada tipo de queso tiene su fórmula específica de producción, muy a menudo con un toque local.

Algunas alternativas básicas de proceso se describen a continuación.

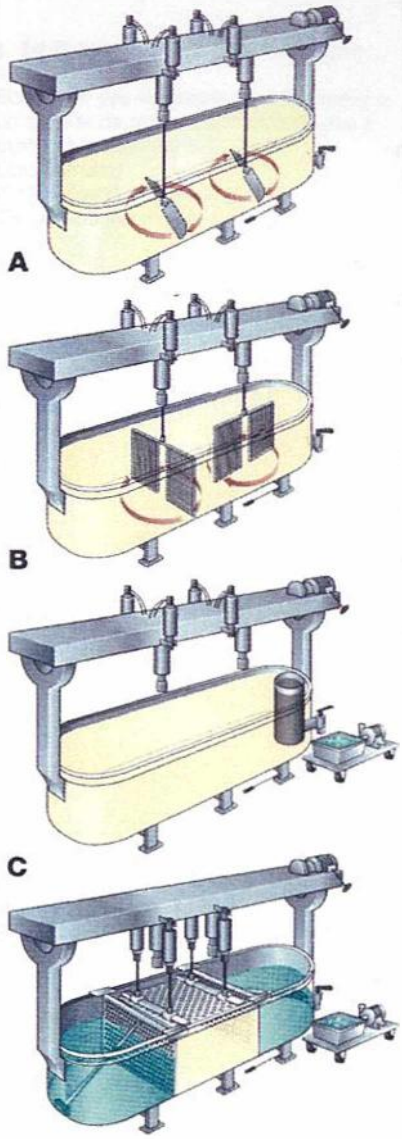
Producción de la cuajada

Tratamiento de la leche

Tal como se ha discutido anteriormente, la leche destinada a fabricar la mayoría de los tipos de quesos se pasteuriza preferentemente justo antes de ser enviada a las tinas de cuajado. Es excepción a esta regla la leche destinada a la fabricación de los quesos Emmenthal suizo y Parmesano.

La leche destinada a la fabricación de queso no se homogeneiza a menos que sea recombinada. La razón fundamental es que la homogeneización causa un aumento sustancial en la habilidad de ligar agua, haciando muy difícil la producción de quesos duros y semiduros. Sin embargo, en el caso especial de los quesos

Evitar la entrada de aire durante el llenado de las tintas o tanques de cuajado.



Blue y Feta que se hacen con leche de vaca, la grasa se homogeneiza en la forma de nata 15-20%. Esto se hace para obtener un producto más blanco y, lo que es más importante, para hacer la grasa de la leche más accesible a la actividad lipolítica a través de la cual se forman los ácidos grasos libres, que son ingredientes importantes en el gusto de estos dos tipos de queso.

Adición del fermento

El fermento normalmente se añade a la leche a aproximadamente 30°C, mientras que se llena la tina (o tanque) de cuajado. Existen dos razones que justifican la dosificación en continuo y en primer lugar del fermento:

1. Para conseguir una distribución buena y uniforme de las bacterias;
2. Para dar tiempo a las bacterias a aclimatarse al nuevo medio. El tiempo necesario desde la inoculación hasta el comienzo del desarrollo, también denominado tiempo de premaduración, es alrededor de 30 a 60 minutos.

La cantidad de fermento necesaria varía con el tipo de queso. En todos los procesos de fabricación de queso la entrada de aire se debe evitar cuando la leche se introduce en los tanques de cuajado, ya que podría afectar a la calidad del coágulo y causar pérdidas de caseina en el lactosuero.

Aditivos y cuajado

Si es necesario, se añade cloruro cálcico y salitre antes de la adición del cuajo. La sal de cloruro cálcico anhidro se puede utilizar en dosis de hasta 20 g/100 kg de leche. El salitre (o nitratos) no debe exceder en su dosificación los 30 g/100 kg de leche. En algunos paises se limitan legalmente las dosis o éstan prohibidas.

La dosis de cuajo es hasta de 30 ml de cuajo líquido de una fuerza de 1:10000 a 1:15000 por cada 100 kg de leche. Para facilitar la distribución, el cuajo se puede diluir con al menos el doble de la cantidad de agua. Tras la dosificación del cuajo, la leche se agita cuidadosamente durante no más de 2-3 minutos. Es importante que la leche se mantenga en reposo en los siguientes 8-10 minutos para evitar afectar negativamente al proceso de coagulación y causar pérdidas de caseina en el lactosuero.

Para facilitar la distribución del cuajo, se dispone de sistemas de dosificación automática para diluir el cuajo con una adecuada cantidad de agua y rociarlo sobre la superficie de la leche por medio de boquillas separadas. Tales sistemas se utilizan fundamentalmente en grandes tinas o tanques de cuajado de tipo cerrado (de 10000 - 20000 l).

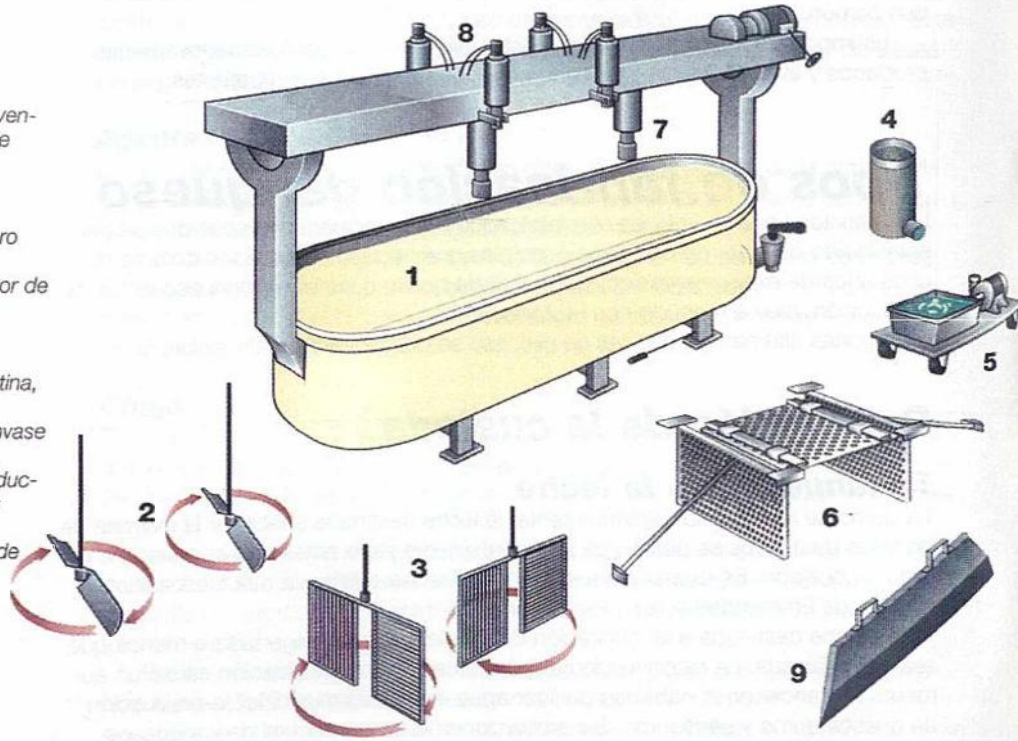


Fig. 14.9 *Tina o cuba de cuajado convencional con accesorios de elaboración de queso.*
A. Tina durante la agitación
B. Tina durante el cortado
C. Tina durante el drenado de lactosuero
D. Tina durante el prensado
1. Tina con camisa, viga soporte y motor de accionamiento de los accesorios
2. Accesorio de agitación
3. Accesorio de cortado
4. Colador para colocarlo dentro de la tina, justo a la salida del suero
5. Bomba de suero sobre carro con envase poco profundo
6. Placas de pre-prensado para la producción de queso de ojos redondeados
7. Soporte para los accesorios
8. Cilindros hidraúlicos para el equipo de pre-prensado
9. Cuchilla de queso

Corte del coágulo

El tiempo de cuajado o de coagulación es normalmente de 30 minutos. Antes de cortar el coágulo, normalmente se lleva a cabo un simple test para determinar su calidad de eliminación de suero, que consiste en clavar un cuchillo en la superficie de la leche coagulada y sacarlo lentamente cortando hacia la superficie hasta que se consigue una ruptura limpia. Se considera que la cuajada estará lista para el cortado tan pronto como se observe un corte de división como de vidrio.

El cortado suave rompe la cuajada en granos con un tamaño de 3-15 mm dependiendo del tipo de queso. Cuanto más fino es el corte menor es el contenido de humedad del queso resultante.

Los utensilios de corte tienen diferentes diseños. La Figura 14.9 muestra una tina convencional de cuajado de tipo abierto equipada con pares intercambiables de utensilios de agitado y cortado.

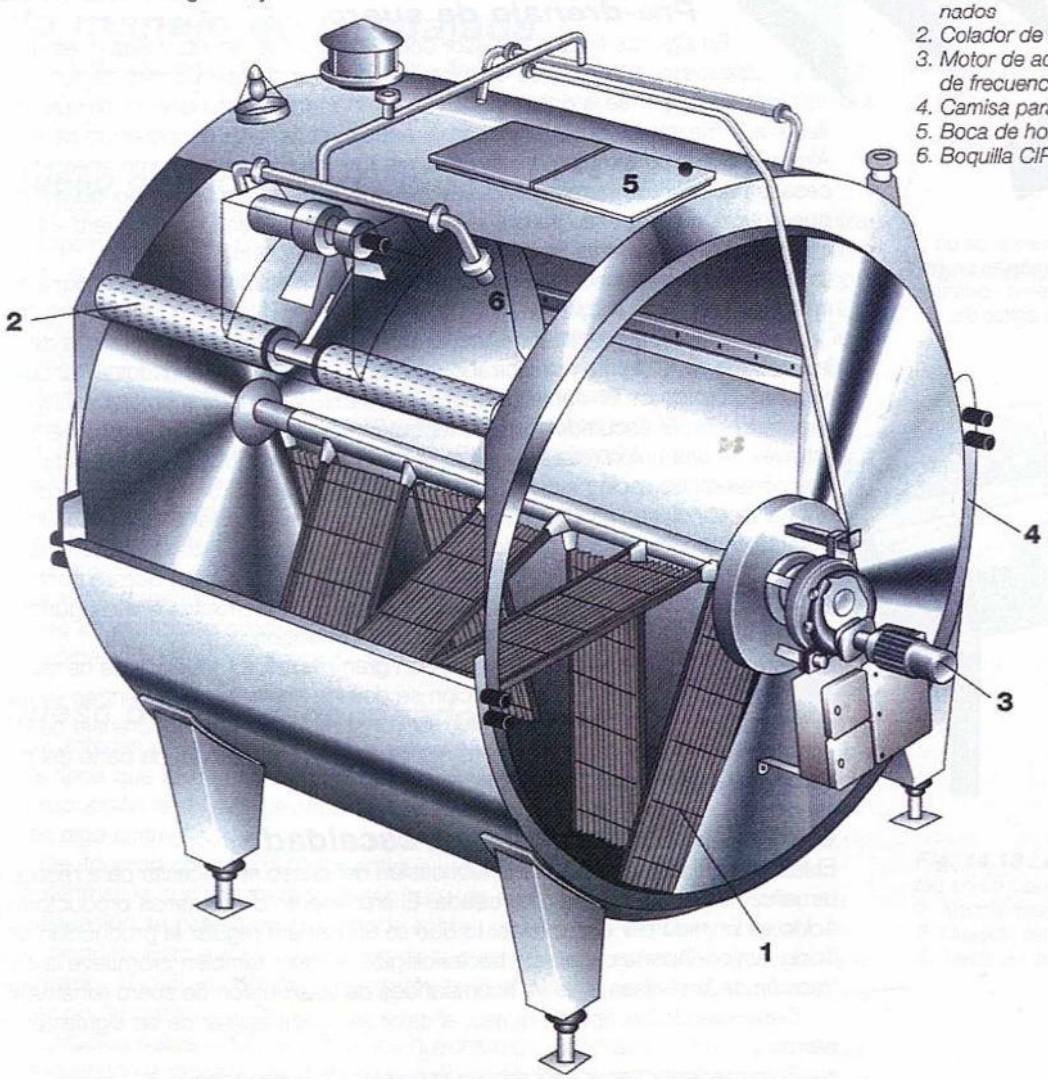


Fig. 14.10 *Tanque cerrado y horizontal de cuajado, con accesorios combinados de agitación y cortado, y sistema elevado de drenado de suero.*
1. Accesorios de agitación y cortado combinados
2. Colador de drenado de suero
3. Motor de accionamiento con cotrolador de frecuencia
4. Camisa para calentamiento
5. Boca de hombre
6. Boquilla CIP

En una cuba quesera horizontal moderna de tipo cerrado (Figura 14.10). la agitación y el cortado se hacen con herramientas soldadas a un eje horizontal accionado por medio de una unidad motora con convertidor de frecuencia. Estas herramientas de doble propósito cortan o agitan dependiendo del sentido de rotación. El coágulo se corta con cuchillos de acero inoxidable radiales en forma de navaja de afeitar con los cantos redondeados para conseguir una mezcla suave y efectiva de la cuajada.

Además, la tina de cuajado puede ir provista de un escurridor de suero operado automáticamente, boquillas de rociado para una apropiada distribución del coagulante (cuajo), y boquillas aspersoras para conectarse a un sistema de limpieza automática (CIP).

Pre-agitación

Inmediatamente después del cortado, los granos de cuajada son muy sensibles al tratamiento mecánico, por lo cual la agitación ha de ser suave. Debe ser, sin em-

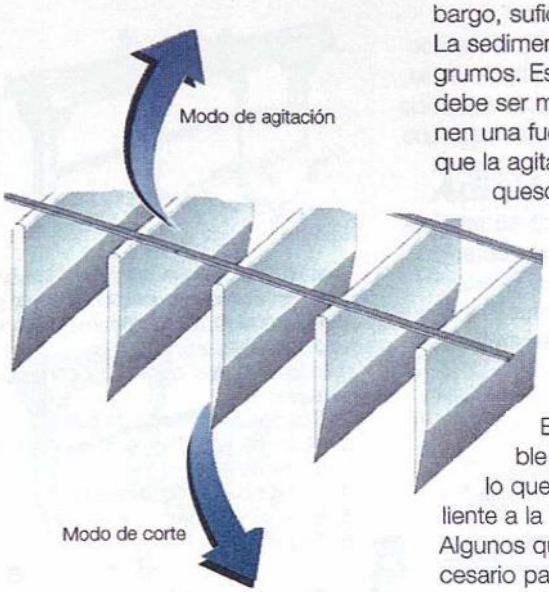


Fig. 14.11 *Sección transversal de un accesorio con palas que trabajan en cortado y agitación con un extremo cortante y otro extremo no afilado de agitación.*

bargo, suficientemente rápida para mantener los granos suspendidos en el suero. La sedimentación de la cuajada en el fondo del envase provoca la formación de grumos. Esto aumenta el esfuerzo a realizar por el mecanismo de agitación, que debe ser muy resistente. La cuajada de quesos con bajo contenido en grasa tienen una fuerte tendencia a depositarse sobre el fondo de la tina, lo que implica que la agitación tenga que ser más intensa que en el caso de las cuajadas de quesos con altos contenidos en grasa.

Los grumos pueden influir sobre la textura del queso así como causar pérdidas de caseina en el suero.

El tratamiento mecánico de la cuajada y la producción continuada de ácido láctico por las bacterias ayuda a la separación de suero de los granos.

Pre-drenaje de suero

En algunos tipos de queso, como los quesos Gouda y Edam, es deseable liberar a los granos de relativamente grandes cantidades de suero por lo que el calor se le puede suministrar mediante adición directa de agua caliente a la mezcla de cuajada y suero, lo que también baja el contenido de lactosa. Algunos queseros también drenan el suero para reducir el consumo energético necesario para el calentamiento indirecto de la cuajada. Para cada tipo individual de queso es importante que se drene cada vez la misma cantidad de suero -normalmente el 35%, y a veces hasta el 50% del volumen del lote.

En una tina convencional, el drenaje del suero es simplemente solucionado como se muestra en la Figura 14.9 C.

La Figura 14.10 muestra el sistema de drenaje de suero en un tanque de cuajado cerrado totalmente mecanizado. Un escurridor tubular longitudinal ranurado está suspendido de un cable de acero inoxidable conectado a un dispositivo elevador exterior. El escurridor está conectado a una tubería de aspiración del suero, a través de una unión rotatoria, y a la pared del tanque que está conectada con una conexión de aspiración exterior. Un electrodo de nivel unido al escurridor controla al motor elevador, manteniendo el escurridor justo debajo del nivel de líquido durante el periodo de drenaje del suero. La señal de comienzo se da automáticamente. Se puede sacar una cantidad predeterminada de suero, que se controla por un indicador de pulsos desde el motor elevador. Interruptores de seguridad indican las posiciones más alta y más baja del escurridor.

El suero se debe evacuar siempre con gran intensidad, es decir se ha de realizar en 5-6 minutos, ya que la agitación se detiene normalmente mientras se realiza el drenaje, y los depósitos se pueden formar al mismo tiempo. El drenaje de suero entonces tiene lugar a intervalos, normalmente durante la segunda parte del periodo de pre-agitación y tras el calentamiento.

Calentamiento/cocción/escaldado

El tratamiento térmico durante la fabricación del queso se necesita para regular el tamaño y la acidificación de la cuajada. El crecimiento de bacterias productoras de ácido es limitada por el calor, por lo que se utiliza para regular la producción de ácido láctico. Aparte del efecto bacteriológico, el calor también promueve la contracción de la cuajada, que va acompañada de la expulsión de suero (sinéresis).

Dependiendo del tipo de queso, el calor se puede aplicar de las siguientes maneras:

- Sólo mediente vapor aplicado en la camisa de la tina/tanque.
- Mediente la aplicación de vapor en camisa en combinación con la adición de agua caliente a la mezcla cuajada/suero.
- Sólo mediante la adición de agua caliente a la mezcla cuajada/suero.

El programa de tiempos y temperaturas de calentamiento viene determinado por el método de calentamiento y el tipo de queso. El calentamiento a temperaturas por encima de 40°C, algunas veces también denominado cocción, normalmente tiene lugar en dos etapas. A 37-38°C se retarda la actividad de las bacterias formadoras de ácido láctico mesófilas, y el calentamiento se interrumpe para comprobar la acidez, tras lo cual el calentamiento continua hasta la temperatura final deseada. Por encima de 44°C las bacterias mesófilas son totalmente inactivadas, y se destruyen si se mantiene la temperatura a 52°C entre 10 y 20 minutos.

El calentamiento más allá de 44°C tipicamente se denomina *escaldado*. Algunos tipos de queso, como Emmenthal, Gruyère, Parmesano y Grana, se escaldan a temperaturas tan altas como 50-56°C. Sólo las bacterias productoras de ácido láctico más resistentes al calor sobreviven a este tratamiento. Una de estas

bacterias es la *Propionibacterium Freudenreichii ssp. Shermanii*, que es muy importante para la formación del carácter del queso Emmenthal.

Agitación final

La sensibilidad de los granos de cuajada decrece conforme avanza el calentamiento y la agitación. Mucho suero es exudado de los granos durante el periodo de agitación final, debido sobre todo al continuo desarrollo de ácido láctico, pero también al efecto mecánico de la agitación.

La duración de la agitación final depende de la acidez y del contenido de humedad deseados en el queso.

Eliminación final de suero y principios de manejo de la cuajada

Tan pronto como se consigue la acidez y firmeza deseadas en la cuajada -y se ha comprobado por el quesero- se elimina el suero residual de la cuajada de distintas maneras.

Queso con textura granular

Una manera es separar el suero directamente de la tina de cuajado. Esto se utiliza principalmente en las tinas abiertas operadas manualmante. Tras el drenado del suero la cuajada se vacía en moldes. El queso resultante adquiere una textura con huecos irregulares u ojos, también denominada textura granular (Figura 14.12). Los huecos se forman principalmente por el gas dióxido de carbono, normalmente implicado en los cultivos LD (*Sc. cremoris/lactis, L. cremoris* y *Sc. diacetylactis*). Si los granos de cuajada se exponen al aire antes de pasarse a moldes y prensarse, no funden completamente; una gran cantidad de huecos estancos al aire permanecen en el interior del queso. El dióxido de carbono formado y desprendido durante el periodo de maduración llena y gradualmente aumenta estos huecos. Estos ojos que se forman de esta manera tienen una forma irregular.

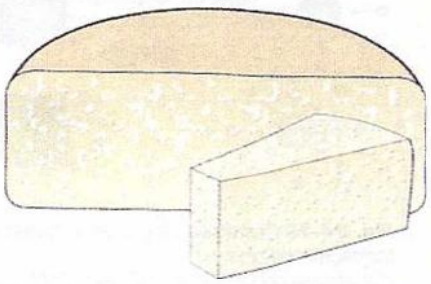


Fig. 14.12 *Queso con textura granular.*

El suero se puede también drenar mediante bombeo de la mezcla cuajada/suero a través de un escurridor vibratorio o rotatorio (Figura 14.13), donde los granos se separan de la cuajada y se descargan directamente en moldes. El queso resultante tiene una textura *granular*.

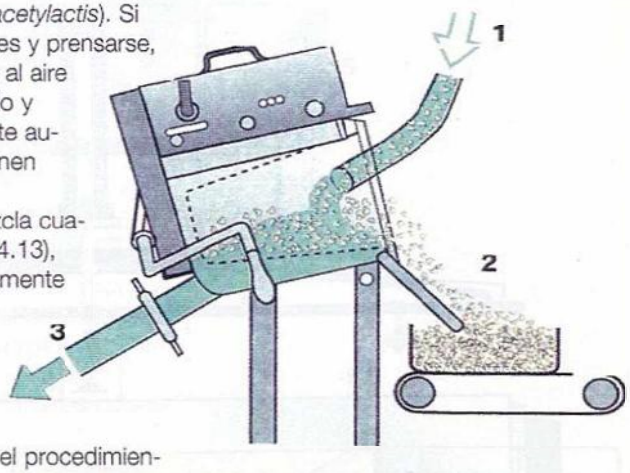


Fig. 14.13 *La cuajada y el suero se separan en un colador o escurridor rotativo.*
1. Mezcla cuajada/suero
2. Cuajada escurrida
3. Salida de lactosuero

Queso de ojos redondeados

Las bacterias productoras de gas, generalmente de los mismos tipos que los mencionados antes, también se utilizan en la producción de queso de ojos redondeados (Figura 14.14), pero el procedimiento es algo diferente.

De acuerdo con los métodos antiguos, como los de preparación del queso Emmenthal, la cuajada se recoge con telas de queso estando aún con suero y a continuación se pasa a un gran molde sobre una mesa de drenaje y prensado combinados. Esto evita la exposición de la cuajada al aire antes de la recogida y el prensado, lo cual es un factor importante en la obtención de la textura correcta en este tipo de queso.

Estudios sobre la formación de los huecos/ojos redondeados han demostrado que cuando se recogen los granos de cuajada debajo de la superficie del suero, la cuajada contiene cavidades microscópicas. El cultivo bacteriano se acumula en estas pequeñas cavidades llenas de suero. El gas que se forma cuando comienzan a crecer inicialmente se disuelve en el líquido, pero como el crecimiento de las bacterias continua, tiene lugar una sobresaturación local que da lugar a la formación de pequeños huecos. Más tarde, después de que se detiene la producción de gas debido a la falta de sustrato, como ácido cítrico, la difusión empieza a ser el proceso más importante. Esto agranda algo los huecos que son ya relativamente grandes, mientras que las cavidades más pequeñas desaparecen. El agrandamiento de los ojos más grandes a expensas de los más pequeños es una consecuencia de las leyes de la tensión superficial, que establecen que se necesita menos presión de gas para agrandar una cavidad grande que en una pequeña. El transcurso de los distintos fenémenos se ilustra en la Figura 14.15. Al mismo tiempo parte del CO_2 se escapa del queso.

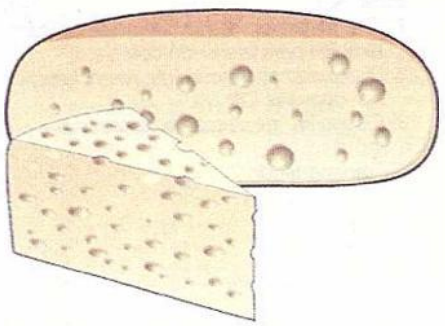


Fig. 14.14 *Queso con ojos redondeados.*

En las tinas de cuajada operadas manualmente de tipo rectangular u oblongo, la cuajada puede ser empujada temporalmente, mientras está aún inmersa en sue-

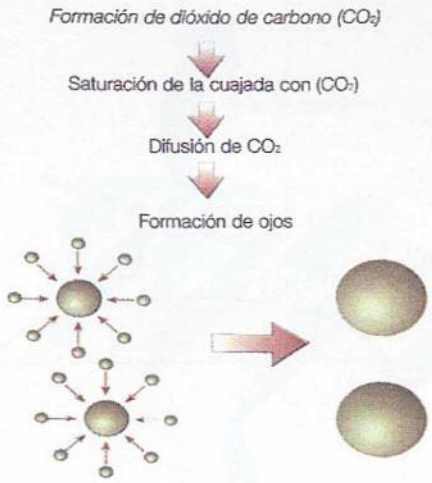


Fig. 14.15 *Desarrollo de gas en el queso y formación de ojos.*
(Por cortesía del Dr. Burling, R&D dept. SMR. Lund, Suecia).

ro, a un compartimento construido con placas perforadas móviles y bandejas móviles. La cuajada se nivela y se coloca una placa de prensado perforada sobre el lecho de cuajada. Dos vigas colocadas en la parte superior de esta placa distribuyen la presión aplicada por la unidad de prensado neumático o hidráulico. El sistema se ilustra en la Figura 14.9 D. Durante el prensado, o más bien periodo de pre-prensado, que normalmente tarda 20-30 minutos, el suero liberado se descarga hasta que se alcanza el nivel del lecho de cuajada. El suero libre remanente se desprende mientras se separan los utensilios de prensado y se corta la cuajada a mano en bloques para llenar los moldes.

Tinas de pre-prensado

El pre-prensado, sin embargo, tiene lugar más a menudo en tinas o cubas separadas donde se bombea primero una cierta cantidad de suero. La mezcla remanente de suero/cuajada se transfiere entonces a esta tina sea por gravedad o mediante una bomba de rotor lobulado, de forma que se minimice la exposición al aire de la cuajada.

La Figura 14.16 muestra un sistema de pre-prensado utilizado para volúmenes de lote más o menos grandes, alrededor de 1000 kg de cuajada o más.

La cuajada se lleva desde la tina o tanque por gravedad o mediante una bomba de rotor lobulado y se distribuye con un colector con boquillas especiales o mediante un dispositivo especial de distribución y nivelado. Cuando se utiliza un colector, la cuajada se debe nivelar a mano con rastrillos.

El suero se separa de los granos de cuajada mediante

- una cinta de plástico tramada,
- una placa perforada de acero inoxidable situada bajo la tapa, y
- placas perforadas situadas en el extremo y lados de la tina.

La tapa se maneja por medio de uno o dos cilindros neumáticos, que se calculan para aplicar una presión de alrededor de 20 g/cm² de la superficie de bloque.

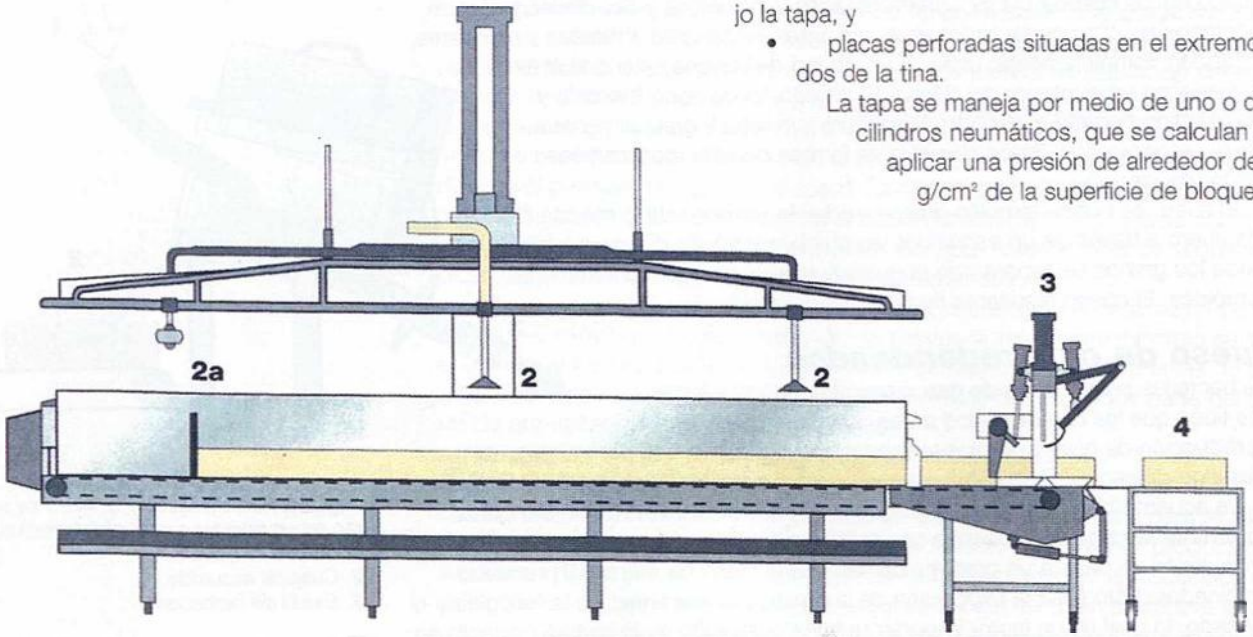


Fig. 14.16 *Tina de pre-prensado operada manualmente con dispositivo de descarga y corte.*

1. *Tina de pre-prensado (se puede utilizar también para prensado completo)*
2. *Distribuidores de cuajada, reemplazables por boquillas CIP (2a)*
3. *Dispositivo de descarga, estacionario o móvil*
4. *Transportador*

Cuando la tina se utiliza para un prensado completo, la presión sobre la superficie debe ser al menos unas 10 veces más alta. La cinta tramada de plástico del fondo también actúa como un transportador sobre el que los bloques de queso pre-prensado se transportan hacia el extremo frontal después de que se abra manualmente la compuerta. Antes de que la tina de pre-prensado se vacíe, se coloca delante un dispositivo de descarga móvil con cuchillos verticales y una guillotina de corte transversal. El espacio entre los cuchillos verticales es ajustable. (Es posible también tener un dispositivo estacionario de descarga sirviendo sólo a una tina). El accesorio de descarga está también equipado para tensar la cinta, que está enrollada en un tambor cilíndrico localizado en el fondo.

Los bloques de cuajada se pueden moldear a continuación manualmente o, más a menudo, automáticamente transportándolos hasta un dispositivo mecanizado de moldeo.

Sistema de pre-prensado continuo

La Casomatic constituye un sistema más avanzado de máquina de pre-prensado continuo, que realiza también el cortado en bloques y el moldeado, tal como se

muestra en la Figura 14.17. El principio de trabajo consiste en que la mezcla cuajada/suero, normalmente en la proporción 1:3.5-4, se introduce por la parte superior de una columna cilindrica, cuadrada o rectangular, el fondo de la cual está cerrado por una cuchilla móvil. El suero drena desde la cuajada a través de secciones perforadas de la columna y pasa un interceptor antes de entrar a un tanque pulmón de recogida de suero, desde donde se bombea a un tanque de almacenamiento. El nivel de suero se controla mediante electrodos de nivel. Tan pronto como el electrodo de nivel más bajo es el único que está húmedo, el suero se bombea desde el interceptor al interior de la columna para impedir que la cuajada sea expuesta al aire.

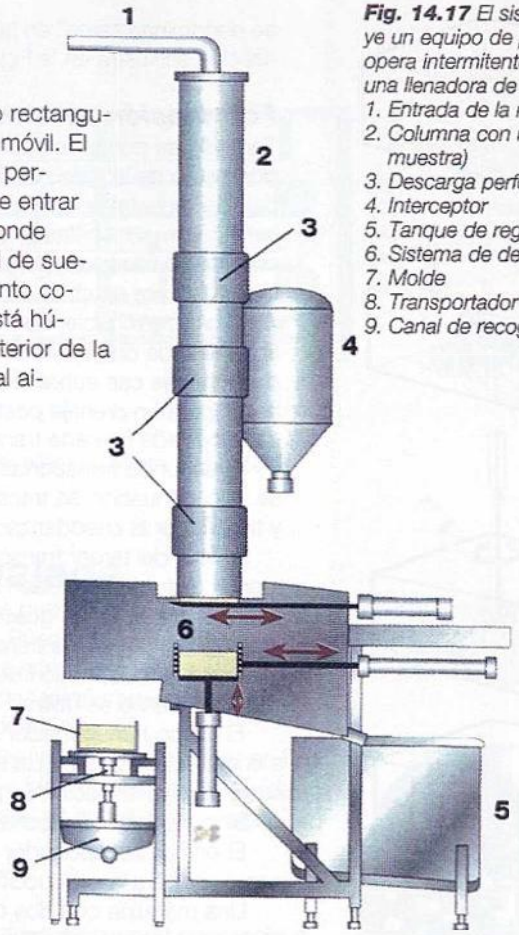


Fig. 14.17 El sistema Casomatic constituye un equipo de pre-prensado continuo que opera intermitentemente, suplementado con una llenadora de moldes.
1. *Entrada de la mezcla*
2. *Columna con mirilla de vidrio (que no se muestra)*
3. *Descarga perforada de suero*
4. *Interceptor*
5. *Tanque de regulación de suero*
6. *Sistema de descarga y cortado de queso*
7. *Molde*
8. *Transportador de retén*
9. *Canal de recogida de suero*

Tras el tiempo de prensado, normalmente 20-30 minutos, la cuajada del fondo de la columna ya se ha prensado por su propio peso hasta el nivel de firmeza requerida. La altura de la columna de queso se selecciona de forma que la presión que prevalezca en el nivel situado a unos 10 cm por encima de la placa-cuchilla móvil del fondo sea del orden de 20 g/cm^2, que es prácticamente la misma presión que se tiene en la tina de pre-prensado. La altura de la columna de cuajada es del orden de 2.2 m y la altura global de la unidad es de hasta 5.5 m. La cuchilla se retira a continuación y la columna de cuajada desciende hasta un nivel pre-establecido. Tan pronto como se consigue ese nivel, la cuchilla retorna a su posición original, cortando la pieza del fondo de esta columna. Esta pieza se retira a continuación de esta máquina y se coloca en un molde que va sobre una cinta transportadora que está situada justo debajo de la columna. En el molde se lleva a cabo el prensado final.

Una columna estandar puede manejar alrededor de 600 kg de cuajada por hora y fabricar quesos de 10-20 kg. Los quesos de 1 kg o más se pueden obtener también instalando un accesorio especial de corte en la salida de la máquina y utilizando multimoldes para recibir las piezas cortadas.

Se pueden conseguir grandes capacidades de trabajo instalando varias columnas juntas de pre-prensado.

El equipo Casomatic va equipado con boquillas spray situadas estratégicamente que permiten que la máquina sea adecuadamente limpiada tras su conexión al sistema CIP (cleaning-in-place).

En la Figura 14.36 se muestra una línea de proceso con pre-prensado continuo.

Quesos de textura cerrada

Los tipos de queso de textura cerrada, de los que el queso Cheddar es un típico ejemplo, se fabrican normalmente con fermentos que contienen bacterias que producen gas. Normalmente se trata de bacterias productoras de ácido láctico de simple cepa, como la *Sc. cremoris* y *Sc. lactis*.

La técnica específica de procesado puede, sin embargo, dar lugar a la formación de cavidades que se denominan huecos mecánicos, como se muestra en la Figura 14.18. Mientras que los ojos en los quesos granulares y de ojos redondos tienen una apariencia brillante característica, los huecos mecánicos tienen una superficie interior rugosa.

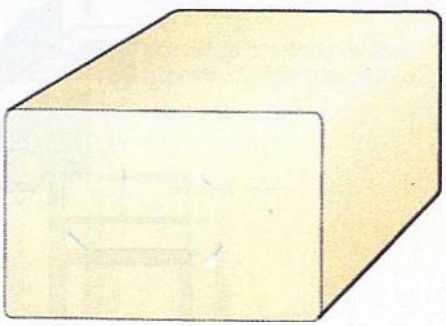


Fig. 14.18 Queso de textura cerrada con las típicas cavidades mecánicas.

Cuando la acidez del suero ha alcanzado alrededor del 0.2-0.22% de ácido láctico (unas 2 horas después de la adición del cuajo), el suero se drena y la cuajada se somete a una forma especial de tratamiento denominada *cheddarización.*

Una vez que el suero se ha descargado, la cuajada se deja que siga acidificándose. Durante este período, normalmente de 2-2.5 horas, la cuajada se divide en bloques que son volteados y apilados. Cuando la acidez del lactosuero exudado ha caido hasta aproximadamente 0.75-0.85% de ácido láctico, los bloques se cortan en "hojas", que se salan en seco antes de ser colocadas en los moldes (que

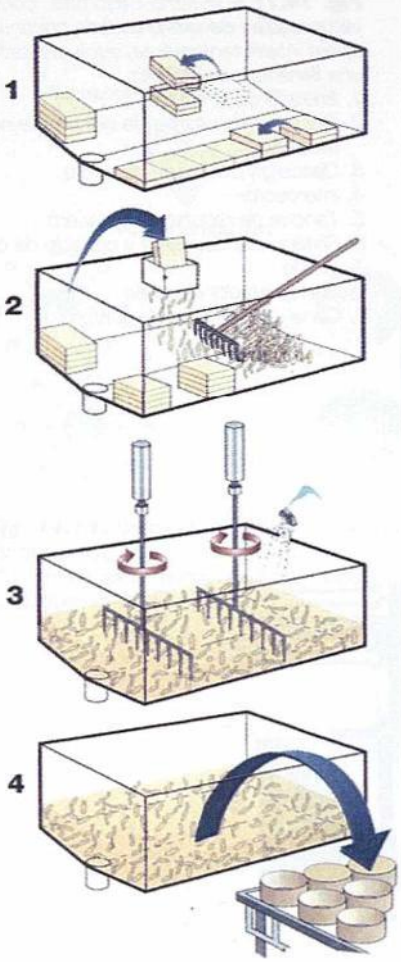


Fig. 14.19 *Pasos del proceso en la fabricación de queso tipo Cheddar.*
1. Cheddarización
2. Molienda en hojuelas
3. Agitación de las hojuelas saladas
4. Colocación de las hojuelas en moldes.

se denominan "aros" en la fabricación del queso Cheddar). El proceso de chaddarización se ilustra en la Figura 14.19.

Fabricación mecanizada del queso Cheddar

También se puede realizar la fabricación del queso Cheddar de forma mecanizada, por medio de la línea Alfomatic, que es un sistema avanzado cuyo principio de trabajo se muestra en la Figura 14.20. Estas máquinas tienen capacidades que oscilan entre 1 y 8 toneladas de queso por día. La versión más común va equipada con cuatro transportadores de cinta, conducidos individualmente a velocidades ajustables pre-establecidas, que van montados uno encima del otro en un bastidor de acero onoxidable. La mezcla cuajada/suero se distribuye uniformemente sobre una malla de drenaje especial donde se elimina la mayor parte del suero. La cuajada entonces cae sobre el primer transportador, que está perforado y tiene agitadores para un drenaje posterior de suero. Las guías controlan la anchura que ocupa la cuajada en cada transportador.

El segundo transportador permite que la cuajada comience a fundirse y a unirse. A continuación se transfiere al tercer transportador donde se voltea la cuajada y tiene lugar la cheddarización.

Al final del tercer transportador la cuajada se corta en hojas de tamaño más o menos uniforme que caen sobre un cuarto transportador. En las máquinas de fabricación de tipos de queso agitados (como el queso Colby) se pueden añadir más agitadores en los transportadores 2 y 3 para facilitar una agitación constante, que evite la fusión/unión de los gránulos de cuajada. En este caso, el molino cortador en hojas no se utiliza.

El último transportador se destina al salado. Inicialmente se suministra sal seca a la cuajada, que se agita a continuación para conseguir una mezcla eficiente. La cuajada a continuación se pasa a una tolva desde donde se envía a un Formador de Bloques o se transporta hasta una unidad de moldeo.

El primer transportador se puede equipar también con un sistema de lavado con agua para la producción del queso Colby, mencionado anteriormente.

Una máquina con dos o tres transportadores es suficiente para la producción de quesos de la familia *Pasta Filata* (Mozzarella, Kashkaval, etc.), donde la cheddarización es una parte de la tecnología de proceso, aunque las hojas de cuajada normalmente no se salan antes de la cocción y extendido.

En la Figura 14.21 se ilustra un diseño de triple transportador, donde se ve que la cuajada se agita sólo en el primer transportador.

La máquina, independientemente del número de transportadores, está equipada con boquillas spray para conectarse al sistema de limpieza CIP, para asegurar una adecuada limpieza y desinfección. La disposición de un recubrimiento a base

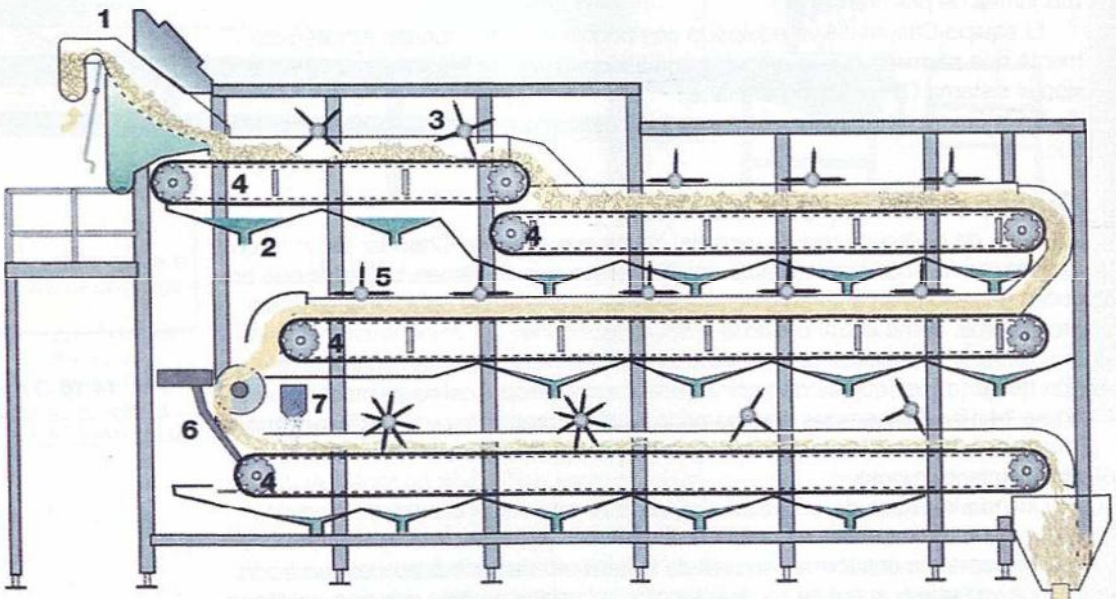


Fig. 14.20 *Sistema continuo de desuerado, cheddarización, molienda, y salado de la cuajada para la fabricación de queso Cheddar.*

1. Escurridor de suero (criba)
2. Colector de suero
3. Agitador
4. Transportadores con motor de velocidad variable.
5. Agitadores (opcionales) para la producción de Cheddar de cuajada agitada
6. Molino de hojuelas
7. Sistema de salado en seco.

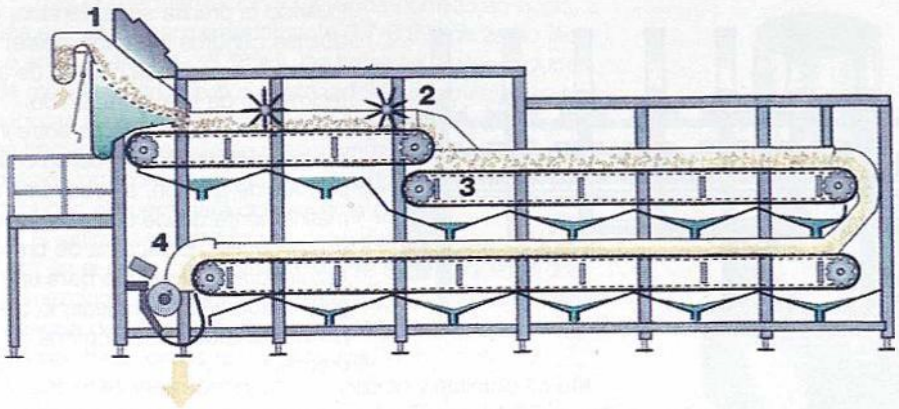


Fig. 14.21 *Máquina de cheddarización continua con tres transportadores, adecuada para el queso Mozzarella.*
1. Criba de suero
2. Agitador
3. Transportador
4. Molino de hojuelas

de paneles separables de acero inoxidable contribuirá efectivamente al mantenimiento de una higiene adecuada.

Tratamiento final de la cuajada

Tal como se ha indicado anteriormente, la cuajada se puede tratar de distintas maneras, una vez que se ha separado el suero libre. Puede ser:

1. Transferida directamente a los moldes (en quesos granulares).
2. Pre-prensada en un bloque y cortada en piezas de tamaño adecuado para su colocación en moldes (en quesos de ojos redondeados).
3. Enviada a cheddarización, la última fase que incluye molienda o cortado en hojas que pueden ser saladas en seco y que serán o bien dispuestas en moldes o, si se destina a los tipos de queso de Pasta Filata, se transfieren sin salar hasta una máquina de cocción-estirado.

Prensado

Después de haber sido moldeada o dispuesta en moldes, la cuajada se somete a un prensado final, que tiene cuatro objetivos:

- ayudar a que se produzca la expulsión final del suero,
- conseguir una determinada textura,
- darle forma al queso,
- proporcionar una corteza al queso que tendrá un largo periodo de maduración.

La velocidad de prensado y la presión aplicada se adaptan a cada tipo particular de queso. El prensado tiene que ser gradual al principio, ya que la aplicación de una presión inicial elevada comprime la capa superficial y puede encerrar humedad en huecos dentro del cuerpo del queso.

Las prensas operadas manualmente de tipo vertical u horizontal se utilizan en la fabricación de queso a pequeña escala. Los sistemas de prensado neumático o hidráulico simplifican la regulación de la presión requerida. La Figura 14.22 muestra una prensa vertical. Una solución más sofisticada es equipar al sistema de prensado con un reloj, señalando al operador cuando se cambia de presión de acuerdo con un programa predeterminado.

Se tienen diferentes sistemas para la fabricación a gran escala.

Fig. 14.22 *Unidad de prensado vertical con placas de prensado operadas manualmente.*

Prensado en mesa

Los sistemas de prensado en mesa se utilizan frecuentemente en plantas de producción de queso semimecanizadas. Comprenden:

- una mesa con ruedas,
- moldes que se colocan sobre la mesa,
- una prensa de túnel con tantos cilindros de prensado como número de moldes colocados sobre la mesa.

Prensa de túnel autoalimentada (prensa Autofeed)

Las prensas de túnel autoalimentadas Autofeed se recomiendan en casos donde se necesitan sistemas muy mecanizados para el prensado del queso. Una vez que llegan al sistema de transporte, los moldes llenos se alimentan automaticamente en una prensa túnel Autofeed en filas de 3 a 5 por medio de un dispositivo de empuje neumático. Las filas de moldes en la prensa se transportan mediante barras de empuje de forma que se desplazan a lo largo de una superficie de acero inoxidable.

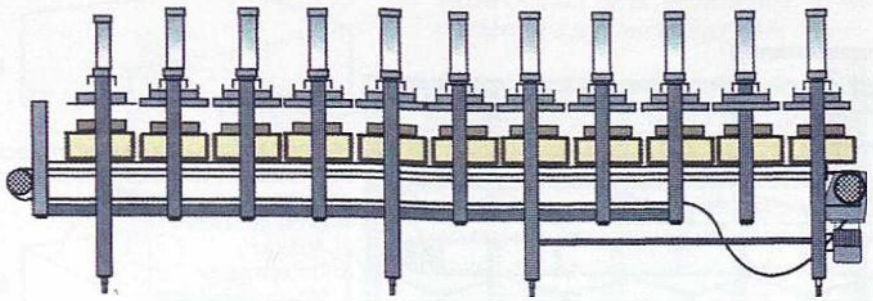


Fig. 14.23 *Prensa de cinta.*

Cuando la prensa se ha llenado, todos los cilindros (uno por molde) se conectan a una línea común de abastecimiento de aire comprimido.
La presión y los intervalos entre incrementos de presión, así como el tiempo total de presión, se controlan automáticamente desde un panel separado de control. El sistema de prensado Autofeed está diseñado para una carga y descarga simultáneas, lo que permite una utilización óptima de la prensa.

Prensa de cinta

Una prensa de cinta (Figura 14.23) se recomienda en los casos donde el tiempo entre pre-prensado y prensado final tiene que ser minimizado. Tanto las prensas de cinta como las autoalimentadas normalmente van equipadas con sistemas de limpieza CIP.

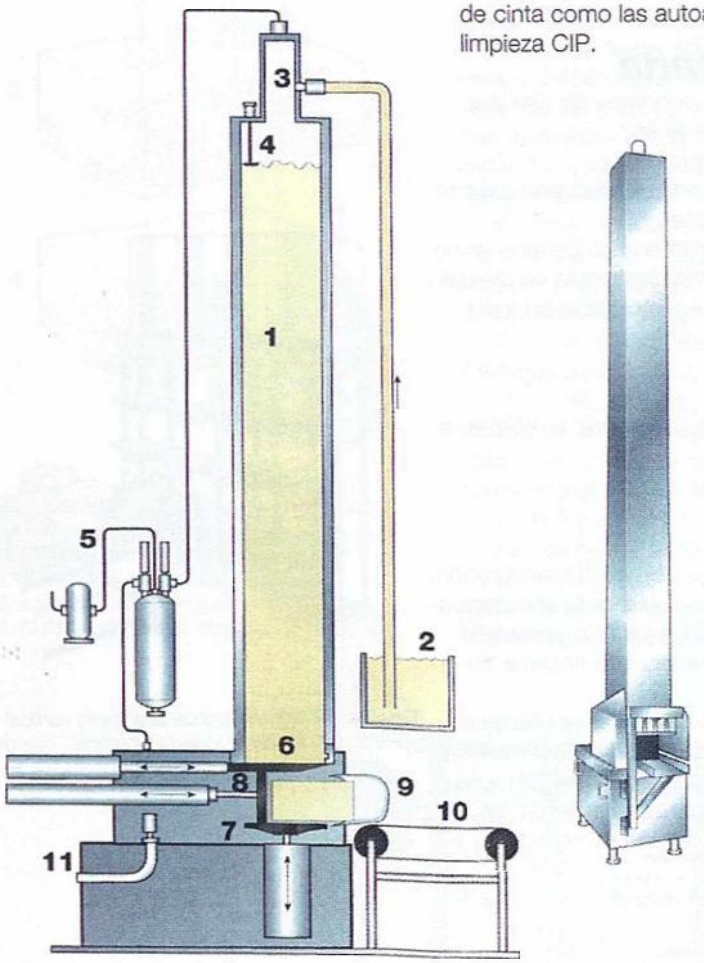


Fig. 14.24 *Sistema de formado de bloques para el queso tipo Cheddar. Principio de trabajo y vista exterior (derecha).*

1. *Columna*
2. *Alimentación de cuajada*
3. *Ciclón*
4. *Sensor de nivel*
5. *Unidad de vacío*
6. *Placa de fondo combinada con una guillotina*
7. *Plataforma elevadora*
8. *Eyector*
9. *Bolsa barrera*
10. *Transportador hasta el sellado a vacío*
11. *Drenado de lactosuero*

Sistema formador de bloques

Uno de los problemas críticos de la fabricación del queso Cheddar ha sido durante mucho tiempo la producción de bloques uniformes y bien formados. El equipo formador de bloques, que utiliza básicamente un sistema simple de tratamiento a vacío y alimentación por gravedad, resuelve este problema. Las hojas saladas se llevan por vacío hasta la parte superior de la torre, tal como se ilustra en la Figura 14.24. La torre se llena, y la cuajada comienza a fundirse (unirse) y convertirse en una masa columnar continua. El vacío se aplica a la columna a través de un programa para conseguir un producto uniforme, libre de suero y aire, en la base de la máquina. Los bloques regulares de idéntico tamaño, que pesan normalmente unos 18-20 kg, son automáticamente guillotinados, separados y envueltos para su envío a la unidad de sellado a vacío que está integrada en la línea de producción. No se necesita un prensado posterior.
La torre se diseña para tener una capacidad nominal de 680 kg/h de cuajada que necesita unos 30 minutos para pasar a través de la torre. Se produce un bloque cada 1.5 minutos. La altura de la columna de cuajada es de unos 5 m, de forma que se necesita una altura total en la torre de 8 metros. Se pueden conseguir capacidades muy elevadas de producción disponiendo varias torres juntas.

Los equipos CIP dispuestos en la parte superior de las torres aseguran unos buenos resultados de limpieza y desinfección.

Cocción y estirado de los tipos de queso de Pasta Filata

Los quesos de Pasta Filata (de cuajada plástica) se caracterizan por tener una cuajada fibrosa "elástica", que se obtiene mediante cocción y estirado de la cuajada cheddarizada. Los quesos de "cuajada ahilada" -Provolone, Mozzarella y Caciocavallo- tienen su origen en el sur de Italia. Pero, actualmente los quesos de Pasta Filata se producen no sólo en Italia sino también en otros paises. El queso Kashkaval que se produce en varios paises de Europa del Este es también un tipo de queso de Pasta Filata.

Tras la cheddarización y molienda-cortado en hojas, a una acidez de aproximadamente 0.7-0.8% de ácido láctico en el suero (31-35.5°SH), las hojas se vierten a cubas de mezclado de acero o contenedores o a máquinas amasadoras llenas con agua caliente a 82-85°C, y las piezas se trabajan hasta que se presentan suaves, elásticas, y libres de grumos. El agua de mezclado normalmente se separa con el suero para conservar la grasa.

El estirado y el mezclado debe ser continuo. El "jaspeado" en el producto acabado puede estar asociado con un mezclado o amasado incompleto, con una temperatura del agua demasiado baja, baja acidez de la cuajada, o a una combinación de estos defectos.

Las máquinas continuas de cocción y estirado se utilizan en la producción a gran escala. La Figura 14.25 muestra un Cocedor-Estirador. La velocidad de rotación de los tornillos es variable de forma que se pueda obtener un modo de trabajo óptimo. La temperatura y el nivel del agua de cocción se controlan de forma continua. La cuajada cheddarizada se transfiere continuamente a una tolva o ciclón de la máquina, dependiendo del método de alimentación -con transportador de tornillo o por impulsión con aire.

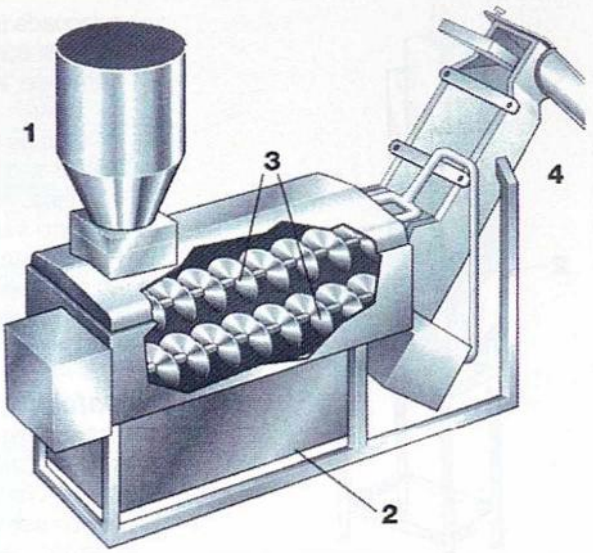


Fig. 14.25 *Equipo cocedor-estirador de operación continua para tipos de queso de Pasta Filata.*
1. Tolva de alimentación
2. Recipiente para agua caliente a temperatura controlada
3. Dos tornillos de giro en sentido contrario
4. Elevador de tornillo

En la producción de queso Kashkaval el cocedor puede contener salmuera con 5-6% de sal en lugar de agua. La salmuera caliente, sin embargo, es muy corrosiva, por lo que el contenedor, tornillos y las demás partes del equipo que entran en contacto con la salmuera deben estar hechos con material especial que sea muy duradero.

Moldeo

Como los quesos de Pasta Filata se presentan según diferentes formas -bola, pera, salchichón, etc.- es difícil describir el proceso de moldeado. Sin embargo, se tienen máquinas de moldeado automático para conseguir las formas cúbicas y rectangulares, normalmente del queso pizza. Estas moldeadoras normalmente constan de tornillos que giran en sentido contrario y un sistema de llenado de moldes giratorio, tal como se ilustra en la Figura 14.26.

La cuajada plástica entra en los moldes a una temperatura de 65-70°C. Para estabilizar la forma del queso y facilitar el vaciado de los moldes, el queso moldeado debe ser enfriado. Para acortar el periodo de enfriamiento/endurecido, se debe incorporar un *túnel de endurecimiento* en la línea completa de Pasta Filata.

En la Figura 14.38 se muestra una línea de producción de los tipos de queso Mozzarella.

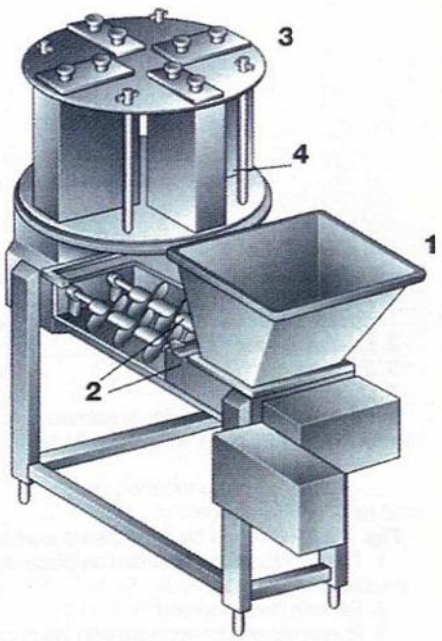


Fig. 14.26 *Máquina de moldeado para queso pizza.*
1. Tolva
2. Tornillos que giran en sentido contrario.
3. Moldes estacionarios y volteables
4. Molde

Salado

En el queso, como en gran cantidad de alimentos, la sal normalmente juega un papel de condimento. Pero, la sal tiene otros efectos importantes, como el retardar la actividad del fermento y los procesos bacterianos asociados con la maduración del queso. La aplicación de la sal a la cuajada provoca que se libere más humedad, debido tanto a un efecto osmótico como a un efecto de salado sobre las proteinas. La presión osmótica puede estar relacionada con la formación de vacío en la superficie de la cuajada, que provoca la liberación de humedad.

Con pocas excepciones, el contenido de sal del queso es de 0.5-2%. El queso azul y las distintas variantes de queso adobado blanco (Feta, Domiati, etc.), sin embargo, normalmente tienen un contenido de sal del 3-7%.

El intercambio que tiene lugar de calcio por sodio en el paracaseinato durante el salado también tiene una influencia favorable sobre la consistencia del queso, que aparece más tierno. En general, la cuajada se expone a la sal a un pH de 5.3-5.6, por ejemplo durante 5-6 horas, tras la adición de un cultivo vital, suponiendo que la leche no contiene sustancias que inhiben las bacterias.

Métodos de salado

Salado en seco

El salado en seco se puede realizar manualmente o mecánicamente. La sal se aplica manualmente desde un cubo o envase similar que contenga una cantidad

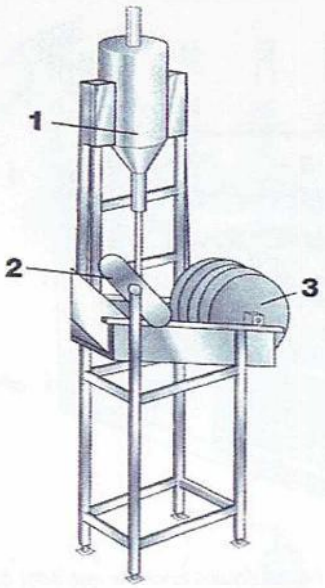


Fig. 14.27 *Saladora en seco de Pasta Filata.*
1. Envase de sal
2. Control de nivel para la masa de queso
3. Accesorio de ranurado

adecuada (pesada), y se aplica lo más uniformemente posible sobre la cuajada, una vez que se ha descargado todo el suero. Para conseguir una distribución completa, la cuajada se debe remover durante 5-10 minutos.

Existen varias formas de distribución mecánica de la sal sobre la cuajada. Una de ellas es similar a la forma usada en la dosificación de la sal sobre las hojas de cheddar, durante la etapa final de paso a través de la máquina de cheddarización continua.

Otro sistema es el de salado parcial, usado en la producción del queso de Pasta Filata (Mozzarella), que se ilustra en la Figura 14.27. El dispositivo de salado en seco se instala entre el cocedor-estirador y la moldeadora. Con esta disposición el tiempo normal de salado de 8 horas se puede reducir a unas 2 horas, necesitándose menos espacio para el salado.

Salado con salmuera

Los sistemas de salado con salmuera pueden tener distintos diseños, desde los sistemas más simples hasta los que tienen una solución técnica muy avanzada. Aún, el sistema más común consiste en colocar el queso en un envase, tina o balsa con salmuera. Las tinas se han de colocar en una cámara refrigerada a unos 12-14ºC. La Figura 14.28 muestra un sistema práctico manejado manualmente.

Se dispone de distintos sistemas basados en el salado poco profundo en canales o en bastidores para la producción a gran escala de queso salado en salmuera.

Salado superficial o poco profundo

En un sistema de salado poco profundo, el queso flota en compartimentos donde tiene lugar el salado en una cara. Para mantener la superficie húmeda, el queso se sumerge por debajo de la superficie a intervalos mediante rodillos en el extremo de cada compartimento. El procedimiento de inmersión se puede programar. La Figura 14.29 muestra el principio de un sistema de salado poco profundo.

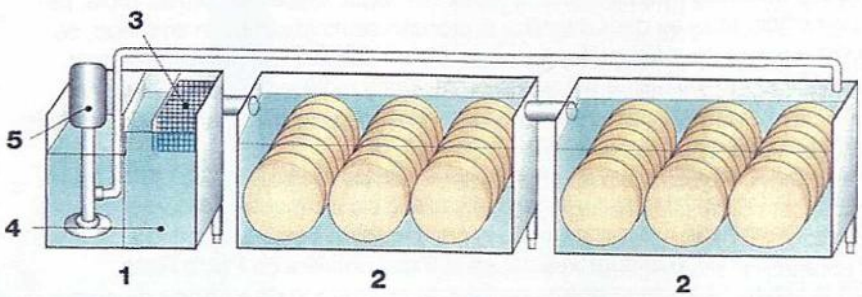


Fig. 14.28 *Sistema de baño de salmuera con envases y equipo de circulación de la salmuera.*
1. Envase de disolución de la salmuera
2. Envases de salado
3. Escurridor
4. Disolución de sal
5. Bomba para circulación de salmuera

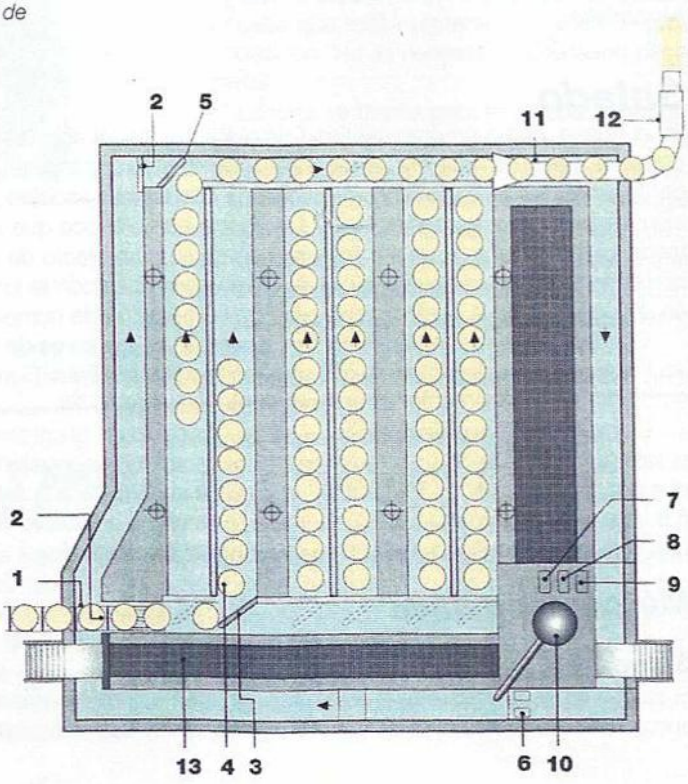


Fig. 14.29 *Sistema de salado en superficie.*
1. Transportador de entrada con placa de deslizamiento.
2. Pantalla de regulación
3. Puerta de entrada con pantalla de regulación y puerta guía
4. Departamento de salado en superficie
5. Puerta de salida
6. Agitador doble con criba
7. Control de nivel de salmuera con bomba
8. bomba
9. Intercambiador de calor de placas.
10. Dosificadora automática de sal (que incluye la medida de concentración de sal)
11. Transportador de descarga con colector
12. Dispositivo de succión de la salmuera
13. Área de servicio
Salmuera

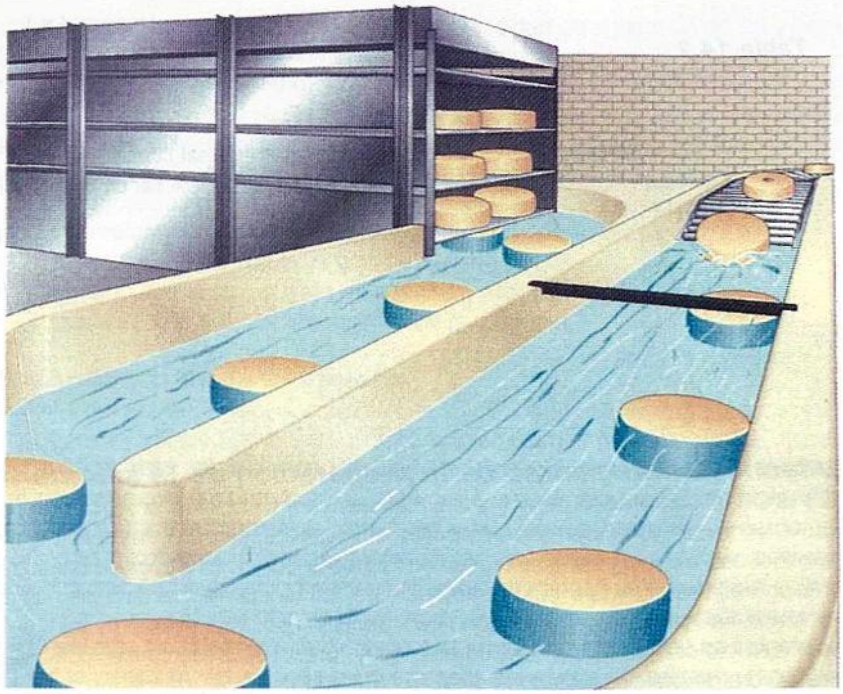


Fig. 14.30 *Sistema de salado en profundidad. La balsa, de 10x1.1 m con 10 capas, puede manejar un lote de producción.*

Salado profundo

El sistema de salado profundo en jaulas suspendidas se basa en el mismo principio. Las jaulas se dimensionan para albergar más o menos una tanda, y una jaula ocupa un compartimento, que tiene una profundidad de 2.5-3 m.

Para conseguir un tiempo de salado uniforme (con el principio FIFO, first in first out, es decir el primero que entra es el que primero sale), la jaula cargada se vacía cuando se ha cumplido ya la mitad del tiempo, enviándose el queso hasta una jaula vacía. De otra forma, si el primero que entra es el último en salir, se podrían tener varias horas de diferencia en tiempo de salado entre los quesos que se cargan al principio y los cargados al final. El sistema de salado profundo se debe siempre diseñar con un compartimento extra dotado de una jaula vacía. La Figura 14.30 muestra la jaula de un sistema de salado profundo.

Sistema de salado en bastidor

Otro sistema de salado profundo es el que se basa en el uso de bastidores capaces de mantener toda la producción de queso de una tina. Todas las operaciones -llenado de los bastidores, colocación de los mismos en la salmuera, la elevación de los bastidores fuera de la salmuera y la conducción de los bastidores hasta una estación de descarga- pueden ser completamente automatizadas. El principio de un sistema de salado en bastidor se muestra en la Figura 14.31.

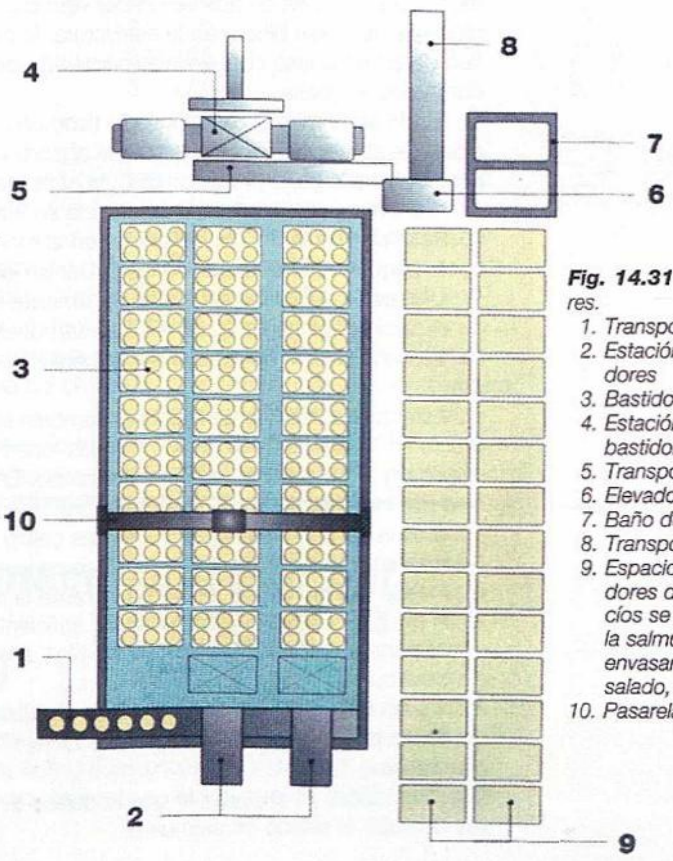


Fig. 14.31 *Sistema de salado en bastidores.*

1. *Transportador de alimentación*
2. *Estación de carga mecánica para bastidores*
3. *Bastidores de salado*
4. *Estación de descarga mecánica para bastidores de salado*
5. *Transportador de descarga*
6. *Elevador*
7. *Baño de enjuagado*
8. *Transportador de cinta*
9. *Espacio para bastidores vacíos y bastidores de repuesto. Los bastidores vacíos se pueden también almacenar en la salmuera. Si los quesos se envasan/tratan inmediatamente tras el salado, este área no se necesita.*
10. *Pasarela de paso superior.*

Tabla 14.2
Densidad frente a concentración de sal en salmuera a 15°C

Densidad		Salmuera de sal común	
Kg/l	°Bé	kg sal en 100 l agua	% sal en la solución
1.10	13.2	15.7	13.6
1.12	15.6	19.3	16.2
1.14	17.8	23.1	18.8
1.16	20.0	26.9	21.2
1.17	21.1	29.0	22.4
1.18	22.1	31.1	23.7

Algunas notas acerca de la preparación de la salmuera

La diferencia de presión osmótica entre la salmuera y el queso provoca que parte de la humedad, junto con sus componentes disueltos, seroproteinas, ácido láctico y minerales, se libere del queso intercambiándose por cloruro sódico. En la preparación de la salmuera es importante que esto sea tenido en cuenta. Además de disolver la sal hasta la concentración deseada, el pH se debe ajustar hasta 5.2-5.3, por ejemplo con ácido clorhídrico para uso en procesos alimentarios, que debe estar libre de metales pesados y arsénico. Se puede utilizar, desde luego, el ácido láctico, así como otros ácidos inocuos.

El calcio en la forma de cloruro cálcico (Cl_2Ca) se debe también añadir para conseguir un contenido en calcio de 0.1-0.2%. La Tabla 14.2 puede servir como guía para la preparación de la salmuera.

Penetración de la sal en el queso

La siguiente breve descripción, basada en lo indicado en el Report No. 22 de Statens Mejeriforsφg, Hillerφd, Dinamarca, da una idea de lo que sucede cuando se sala el queso:

La cuajada del queso está entrelazada por capilares. Se han encontrado aproximadamente unos 10.000 capilares por cm^2. Existen varios factores que pueden afectar la permeabilidad de los capilares y la habilidad de la solución salina para fluir a su través, pero no todos estos factores se ven afectados por cambios en la tecnología. Esto es de aplicación por ejemplo al contenido en grasa. Como los glóbulos de grasa bloquean la estructura, la penetración de sal consumirá más tiempo en un queso con elevado contenido de grasa que en un queso con bajo contenido en grasa.

El pH en el momento del salado tiene una influencia considerable sobre la velocidad de absorción de sal. Se puede absorber más sal a pH bajo que a pH más alto. Sin embargo, a pH bajo, <5.0, la consistencia del queso es dura y quebradiza. A pH más alto, >5.6, la consistencia es más elástica.

La importancia del pH del queso en el momento del salado ha sido analizada por un equipo de investigación de la Danish Hillerφd Institution:

Una parte del calcio está más débilmente ligada a la caseina, y durante el salado el calcio débilmente ligado es intercambiado por sodio en un intercambio iónico. La consistencia del queso dependerá de la cantidad de calcio debilmente ligado.

Este calcio débilmente ligado es también sensible a la presencia de iones hidronio (H^+). Cuanto más iones H^+, más iones calcio (Ca^{++}) dejarán el complejo caseina, y el H^+ ocupará el lugar del calcio. En el salado, los H^+ no se intercambian por Na^+ (sodio) en la sal. Esto significa que:

1. A elevado pH (6.0-5.8) se tiene más calcio en la caseina. Como consecuencia más sodio estará ligado al complejo caseina, y el queso será más tierno. Puede incluso perder su forma durante la maduración.
2. A pH 5.2-5.4-5.6 se pueden tener suficientes iones Ca^{++} y H^+ en el complejo caseina como para ligar suficiente Na^+ a la caseina. La consistencia resultante será buena.
3. A bajo pH (<5.2), se pueden incluir demasiados iones H^+; como los iones Na^+ no se pueden intercambiar por los iones H^+, la consistencia será dura y quebradiza.

Conclusión: es importante que el queso tenga un pH de alrededor de 5.4 antes de sufrir el salado en salmuera.

La temperatura también influye sobre la velocidad de absorción de sal y por lo tanto sobre las pérdidas de humedad. Cuanto más elevada es la temperatura, más elevada es la velocidad de absorción.

Cuanto más elevada sea la concentración de la salmuera, más sal se absorberá. A concentraciones bajas de sal, <16%, la caseina se hincha y la superficie será pegajosa, viscosa, como consecuencia de la redisolución de la caseina.

Las concentraciones de sal de hasta 18-23% se utilizan normalmente junto con temperaturas de 10-14ºC. El tiempo de salado depende de:

- el contenido de sal típico del tipo de queso
- el tamaño del queso -cuanto más grande, más tiempo será necesario
- el contenido de sal y la temperatura de la salmuera.

Tratamiento de la salmuera

Además del ajuste de la concentración de sal, se debe mantener bajo control el estado microbiológico de la salmuera, ya que se pueden presentar varios defectos de calidad si esto no se realiza. Ciertos microorganismos tolerantes a la sal pueden descomponer las proteinas, dando lugar a una superficie viscosa; otros pueden dar lugar a la formación de pigmentos y decolorar la superficie. El riesgo de problemas microbiológicos procedentes de la salmuera es mayor cuanto menor es la concentración de la solución salina utilizada (<16%).

La pasteurización se emplea a veces.

- El sistema de salado se ha de diseñar de manera que la salmuera pasteurizada no se pueda mezclar con la salmuera no pasteurizada.
- La salmuera es corrosiva, por lo que se deben utilizar materiales resistentes en el intercambiador de calor, tales como titanio. Estos materiales, sin embargo, son caros.

Tabla 14.3
Contenido de sal en diferentes tipos de queso.

	%sal
Queso Cottage	0.25 - 1.0
Emmenthal	0.4 - 1.2
Gouda	1.5 - 2.2
Cheddar	1.75 - 1.95
Limburger	2.5 - 3.5
Feta	3.5 - 7.0
Gorgonzola	3.5 - 5.5
Otros quesos azules	3.5 - 7.0

La pasteurización desequilibra la solución salina y provoca precipitaciones de fosfato cálcico; parte de éste se depositará en las placas y parte se depositará en el fondo de la tina de salado como fango. También se emplean aditivos químicos. El hipoclorito sódico, el sorbato sódico o potásico, o la pimaricina son algunos de los aditivos químicos que se utilizan con resultados variables. El uso de aditivos ha de cumplir necesariamente con la legislación actual.

Otras maneras de reducir o detener la actividad microbiológica son:

- pasar la salmuera a través de la luz UV, pero se ha de cumplir que la salmuera
  - haya sido filtrada, y
  - no se mezclará con la salmuera no tratada tras el tratamiento.
- microfiltración, con las mismas reservas que las indicadas anteriormente.

La Tabla 14.3 relaciona los porcentajes de sal en algunos tipos de queso.

Maduración y almacenamiento del queso

Maduración (curado)

Una vez obtenida la cuajada todos los quesos, excepto los frescos, sufren toda una serie de procesos de naturaleza microbiológica , bioquímica y física. Estos cambios afectan tanto a la lactosa, como a las proteinas y la grasa, y constituye un ciclo de maduración que varía ampliamente entre los quesos duros, semiduros

y blandos. Además, se tendrán diferencias considerables entre los diferentes tipos de quesos.

Descomposición de la lactosa

Las técnicas que se han desarrollado para la fabricación de los diferentes tipos de queso se han dirigido siempre hacia el control y regulación del crecimiento y actividad de las bacterias del ácido láctico. De esta manera es posible influir simultáneamente tanto en el grado como en la velocidad de fermentación de la lactosa. Se ha comentado anteriormente que en el proceso de cheddarización, la lactosa está ya fermentada antes de que la cuajada se pase a los moldes. En cuanto a los demás tipos de queso, la fermentación de la lactosa debe controlarse de tal manera que la mayor parte de la descomposición tenga lugar durante el prensado del queso y, después, durante la primera semana o posiblemente las dos primeras semanas de almacenamiento.

El ácido láctico que se produce es neutralizado en gran medida en el queso por los componentes tampón de la leche, que se encuentran la mayoría en el coágulo. De aquí que el ácido láctico se encuentre en la forma de lactatos en el queso obtenido. En la última etapa, los lactatos proporcionan un sustrato adecuado para las *bacterias del ácido propiónico*, que constituyen una parte importante de la flora microbiana de los quesos Emmenthal, Gruyère y tipos similares. Además de los ácidos propiónico y acético, se forman cantidades considerables de dióxido de carbono, que son la causa directa de la formación de grandes ojos redondeados en los tipos de queso anteriormente mencionados.

Una fermentación defectuosa puede causar que el queso reviente.

Los lactatos pueden también ser descompuestos por las *bacterias del ácido butírico*, si por el contrario las condiciones son favorables para esta fermentación, en cuyo caso se produce hidrógeno además de ciertos ácidos grasos volátiles y dióxido de carbono. Esta fermentación defectuosa aparece en la última etapa, de forma que el hidrógeno puede causar que el queso reviente.

Los cultivos normalmente utilizados en la producción de la mayoría de los tipos de queso semiduros y duros, no sólo provocan la fermentación de la lactosa, sino también tienen la habilidad de atacar simultáneamente al ácido cítrico del queso, lo que produce dióxido de carbono que contribuye a la formación tanto de ojos redondos como granulares.

La fermentación de lactosa viene causada por la enzima lactasa presente en las bacterias del ácido láctico.

Descomposición de proteinas

La maduración del queso, especialmente del queso duro, se caracteriza sobre todo por la descomposición de las proteinas. El grado de descomposición de las proteinas afecta la calidad del queso de forma considerable, sobre todo su consistencia y el gusto. La descomposición de las proteinas es llevada a cabo por los sistemas enzimáticos del:

- cuajo
- microorganismos
- plasmina, un enzima que es parte del sistema fibrinolítico.

El único efecto del cuajo es la rotura de la molécula de paracaseina en polipéptidos. El primer ataque del cuajo, sin embargo, hace posible que la descomposición de la caseina sea considerablemente más rápida a través de la acción de las enzimas bacterianas, lo que será interesante si estas enzimas tienen que atacar directamente la molécula de caseina. En los quesos con altas temperaturas de cocción, los quesos escaldados como el Emmenthal y Parmesano, la actividad de la plasmina juega un papel importante en este primer ataque.

En los quesos semiduros como el Tilsiter y Limburger, tienen lugar dos procesos de maduración paralelamente, el proceso normal de maduración del queso y el proceso de maduración en la corteza que se forma sobre la superficie. En este último proceso, tiene lugar la descomposición de las proteinas hasta la formación final de amoníaco, como resultado de la fuerte acción proteolítica de las bacterias que actúan en superficie.

Almacenamiento

El objetivo del almacenamiento es crear las condiciones externas que son necesarias para controlar, en la medida de lo posible, el ciclo de maduración del queso. Según el tipo de queso, se debe mantener una combinación específica de temperatura y humedad relativa, en las diferentes cámaras de almacenamiento durante las distintas etapas de maduración.

Condiciones de almacenamiento

Según el tipo de queso, se requieren condiciones distintas de temperatura y humedad relativa (HR) en las cámaras de maduración.

Las condiciones climáticas son de gran importancia en la velocidad de maduración, pérdidas de peso, formación de corteza y desarrollo de la flora microbiana en superficie (en los tipos Tilsiter, Romadur y otros). En otras palabras, las condiciones climáticas influirán sobre todas las características o naturaleza del queso.

A los **quesos con corteza**, que son la mayoría de los quesos de tipo semiduro y duro, se les puede aplicar un recubrimiento a base de una emulsión plástica o parafina o cera.

Los **quesos sin corteza** se cubren con un film plástico o una bolsa de plástico retráctil.

El recubrimiento del queso persigue una doble finalidad:

1. prevenir una excesiva pérdida de agua,

2. proteger la superficie de la infección y la suciedad.

Los cuatro ejemplos siguientes darán algunas ideas sobre la variedad de condiciones de almacenamiento para los diferentes tipos de queso.

1. Los quesos de la familia Cheddar sufren a menudo la maduración a bajas temperaturas, 4-8ºC, y HR inferiores al 80%, ya que normalmente se envuelven en una película plástica o bolsa y se envasan en cajas de cartón o madera antes de llevarse al almacén. El tiempo de maduración puede variar entre algunos meses hasta 8-10 meses para satisfacer las preferencias de determinados consumidores.

2. Otros tipos de queso como el Emmenthal pueden necesitar almacenarse en una cámara de maduración "verde" a 8-12ºC durante 3-4 semanas seguidas de un almacenamiento en una cámara de fermentación a 22-25ºC durante unas 6-7 semanas. Después de ésto, el queso se almacena durante varios meses en una cámara de maduración a 8-12ºC. La HR en todas las cámaras es normalmente del 85-90%.

3. Los tipos de queso "tratados en superficie" -Tilsiter, Havarti y otros- normalmente se almacenan en una cámara de fermentación durante unas 2 semanas a 14-16ºC y una HR del 90%, y durante este tiempo la superficie es tratada con un cultivo especial mezclado con una solución salina. Una vez que se ha desarrollado la corteza deseada, el queso normalmente se transfiere a una cámara de maduración a una temperatura de 10-12ºC y una HR del 90% durante más de 2-3 semanas. Eventualmente, tras el lavado de la corteza y una vez que el queso se ha envuelto en hoja de aluminio, se transfiere a una cámara fría, a 6-10ºC y alrededor del 70-75% de HR, donde permanecerá hasta su distribución.

4. Otros tipos de queso duro y semiduro, como el Gouda y similares, se pueden almacenar en primer lugar durante un par de semanas en una cámara de queso "verde" a 10-12ºC y a una HR del 75%. Después de ésto seguirá un período de maduración de 3-4 semanas a 12-18ºC y 75-80% de HR. Finalmente, el queso se transfiere a una cámara de almacenamiento a unos 10-12ºC y a una HR del 75% donde se desarrollarán las características finales.

Los valores dados para las temperaturas y humedades relativas, HR, son aproximados y varían según los tipos de queso dentro del mismo grupo. Los valores de humedad no son importantes para los quesos que se curan envueltos en película plástica o en bolsas.

Fig. 14.32 *Almacenamiento mecanizado de queso. El aire humidificado se impulsa a través de boquillas de plástico dispuestas en cada nivel de queso.*

Métodos de acondicionamiento de aire

Normalmente se necesita un sistema completo de acondicionamiento de aire para mantener las condiciones necesarias de humedad y temperatura en la cámara de

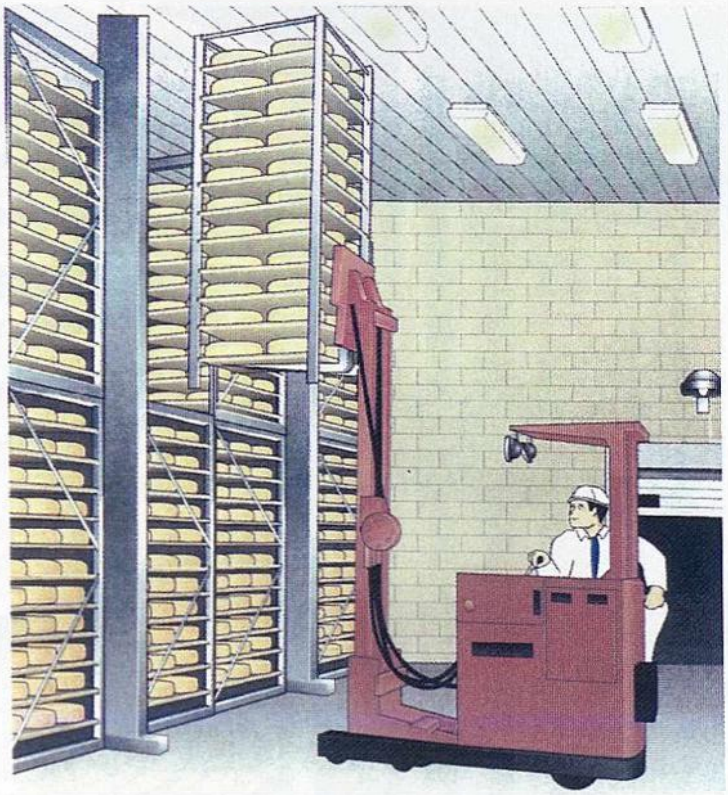


Fig. 14.33 *Almacenamiento de queso utilizando palés.*

maduración del queso, ya que se tiene que eliminar humedad, lo cual será difícil si el aire ambiente tiene una humedad relativa elevada. El aire entrante se ha de secar por refrigeración, seguido de una rehumidificación controlada y un calentamiento hasta las condiciones deseadas.

Puede ser también difícil distribuir de forma uniforme la humedad del aire a todas las partes de la cámara. La disposición de conductos de distribución del aire puede ser de gran ayuda, aunque son difíciles de mantener libres de la contaminación de mohos. Los conductos se han de diseñar entonces para permitir su limpieza y desinfección.

Distribución en la cámara y necesidades de espacio

La distribución en la cámara depende del tipo de queso. La instalación de *bastidores de queso* fijos en la cámara ha sido la solución convencional tanto para los quesos duros como los semiduros. La capacidad de un almacén, para quesos que pesan unos 8-10 kg y que vayan dispuestos en 10 bastidores superpuestos uno encima del otro, sería de aproximadamente 300-350 kg/m^2. Se han de dejar espacios vacíos entre pilas de bastidores de 0.6 m de ancho, y se tendría un pasillo principal en el centro de la cámara de 1.50-1.80 m de ancho. *Si se montan los bastidores sobre ruedas o se cuelgan de railes* se elimina la necesidad de espacios entre bastidores. Se pueden poner unos junto a otros y sólo se moverían cuando se manejan los quesos. Este sistema incrementa la capacidad de almacenamiento un 30-40%, pero aunque el coste del almacén sigue siendo el mismo, aumenta el coste de esta solución de disposición de bastidores.

Los bastidores-palé o contenedores-palé son sistemas ampliamente utilizados. Los palés o contenedores-palé se pueden disponer también sobre palés especiales con ruedas que se mueven sobre railes. Este método también permite un almacenamiento más compacto. La Figura 14.32 muestra un almacén de queso mecanizado. Se colocan 5 quesos en una bandeja de mantenimiento de madera, la bandeja se lleva a una cámara de queso "verde", y a continuación a un elevador especialmente diseñado -que no se muestra en el dibujo- que baja o sube la bandeja hasta un nivel preestablecido y la empuja al interior del almacén. La Figura 14.33 muestra una cámara de maduración a base de palés.

El queso madurado en film se envasa en cajas de cartón y se apila en palés durante la última parte del período de almacenamiento. Esto significa que el queso se puede almacenar de manera compacta. Los palés no se pueden apilar uno encima de otro, por lo que se pueden utilizar bastidores palé. Sin embargo, si se adopta este método se debe tener en cuenta la carga por unidad de area, ya que la carga podría exceder la normalmente permitida en almacenes antiguos.

El sistema de contenedores incrementa considerablemente la capacidad de almacenamiento si se compara con la solución a base de bastidores fijos.

Sin embargo, *existen compañías especializadas en sistemas de almacenamiento* con distintos grados de sofisticación: desde los bastidores tradicionales hasta los sistemas computerizados. Estas empresas pueden aconsejar acerca de las condiciones óptimas de acondicionamiento del aire para los distintos sistemas.

La carga por unidad de área debe ser tenida en cuenta si se adopta el método de palé bastidor, ya que el peso excederá con mucho la carga normal permitida en almacenes frigoríficos.

Líneas de proceso para los quesos duros y semiduros

Esta parte del capítulo sólamente describirá algunos ejemplos de líneas de proceso para algunos tipos típicos de queso.

Tipos de queso duro

Línea de proceso para el queso Emmenthal

La leche para el queso Emmenthal normalmente no se pasteuriza, pero si se normaliza el contenido en grasa. En los períodos donde se produzcan cargas elevadas de esporas bacterianas, la leche también se puede tratar en una planta de Bactofugación o Microfiltración, para conseguir una reducción mecánica de esporas, antes de realizarse el calentamiento a 50-63°C.

Después del pre-tratamiento, que incluye la adición de los ingredientes necesarios, puede comenzar la producción de cuajada. En la Figura 14.34 se muestra un diagrama de flujo preliminar para la producción de queso Emmenthal sin corteza.

Una vez que la cuajada se ha acidificado satisfactoriamente y está suficientemente firme, parte del suero se drena de la tina de queso y se envía a la tina de prensado (2). Cuando se ha transferido una cantidad adecuada de suero, la mezcla suero/cuajada se bombea a la tina de prensado a través de tres distribuidores. Después de la transferencia de la mezcla cuajada/suero y del nivelado manual de la cuajada (se dispone también de sistemas mecánicos combinados de distribución y nivelado), se baja la tapa de la prensa. El excedente de suero se drena simultáneamente.

La aplicación del programa de presiones durante tiempos determinados se prolonga durante 10-20 horas, dependiendo del desarrollo de ácido láctico.

Tras el prensado el lecho de queso se corta en bloques de tamaño adecuado para ser transportados a continuación a través de dispositivos de descarga, que están provistos de cuchillas verticales de corte longitudinal y una guillotina para el corte transversal.

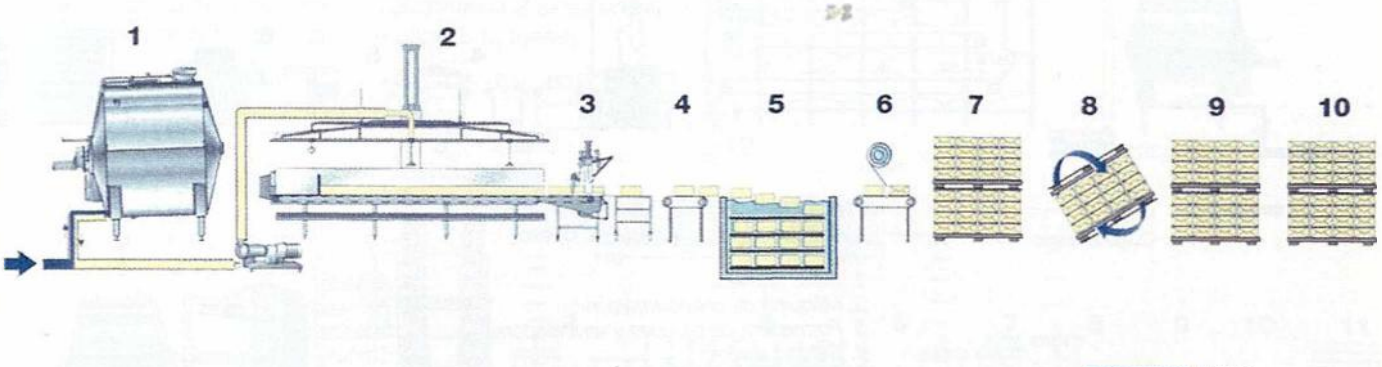


Fig. 14.34 *Diagrama de flujo del proceso de producción mecanizada de queso Emmenthal con corteza.*

1. *Cuba quesera*
2. *Tina de prensa para el prensado total de la cuajada*
3. *Dispositivo de descarga y cortado*
4. *Transportador*
5. *Salado*
6. *Envoltura en film y encajado*
7. *Quesos paletizados en almacenamiento de queso "verde"*
8. *Volteo del queso*
9. *Cámara de fermentación*
10. *Cámara de maduración*

El corte del lecho de cuajada en bloques provoca la exposición de nuevas superficies sin "piel". A veces éstas se sellan antes del salado con el fin de conseguir una penetración uniforme de la salmuera. Esto se realiza mediante prensado con un hierro caliente recubierto con Teflón.

Como los quesos Emmenthal son normalmente grandes, desde 30 a más de 50 kg, el período de salado variará y puede durar hasta 7 días.

Después del salado, el queso sin recubrimiento normalmente se envuelve en film y se envasa en cajas o contenedores grandes antes de llevarse a las cámaras de almacenamiento. Se recomienda el volteo del queso durante el almacenamiento para conseguir una forma correcta y una formación uniforme de ojos. El volteo paletizado se puede realizar mediante carretillas elevadoras especialmente diseñadas.

Línea de proceso para el queso Cheddar

Los quesos Cheddar y tipos similares son los más ampliamente fabricados en el mundo.

El queso Cheddar generalmente tiene una humedad sobre base de grasa libre (HBGL) del 55% lo que significa que puede clasificarse como un queso duro aunque esté en el límite de los tipos semiduros. En la Figura 14.35 se muestra el principio de trabajo de una línea de producción muy mecanizada.

La cuajada normalmente se fabrica a partir de leche normalizada en grasa y pasteurizada. A una acidez de un 0.2% de ácido láctico (a.l.), tras una producción de unas 2 a 2.5 horas, la mezcla cuajada-suero se bombea desde la cuba hasta la máquina continua de cheddarización (2). El pre-drenado de suero normalmente no se realiza.

Para mantener una alimentación continua, se planifica la utilización de un número calculado de cubas que se vacían secuencialmente a intervalos regulares, como por ejemplo cada 20 minutos.

Tras la fase de cheddarización de unas 2.5 horas que incluye la molienda y el salado en seco de las hojuelas a una acidez de aproximadamente 0.6% de a.l., las hojas se transportan neumáticamente hasta la máquina formadora de bloques (3). Se debe disponer de un adecuado número de máquinas formadoras de bloques para mantener el proceso continuo.

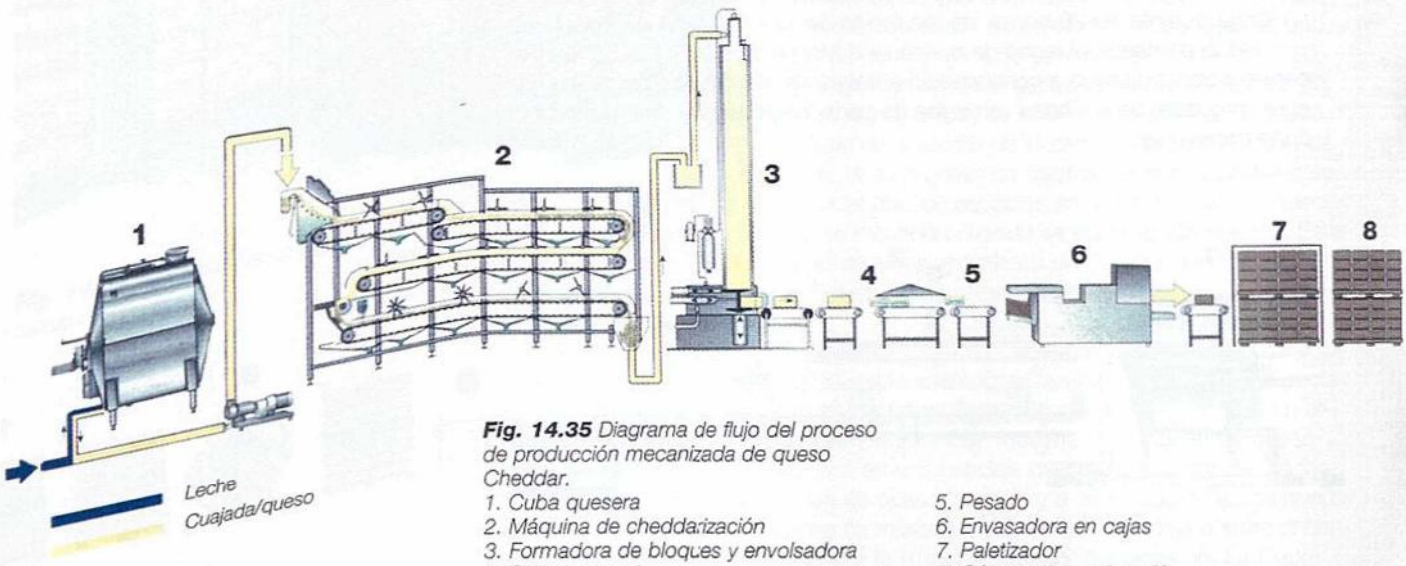


Fig. 14.35 *Diagrama de flujo del proceso de producción mecanizada de queso Cheddar.*

1. *Cuba quesera*
2. *Máquina de cheddarización*
3. *Formadora de bloques y envolsadora*
4. *Sellado a vacío*
5. *Pesado*
6. *Envasadora en cajas*
7. *Paletizador*
8. *Cámara de maduración*

La salida de cada máquina formadora de bloques es manualmente abastecida con bolsas de plástico en las que se meterán los bloques cortados. El bloque embolsado se envia entonces a una máquina de sellado a vacío (4). Después del sellado el queso se pesa (5) de camino hacia una máquina (6) donde se recubre de cartón, enviándose a continuación hasta un paletizador (7). El palé lleno es finalmente transportado hasta la cámara de maduración, donde el queso se mantiene desde 4 a 12 meses a una temperatura de 4-8ºC.

Tipos de queso semiduro

Línea de proceso para el queso Gouda

El queso Gouda es probablemente el tipo de queso más conocido representativo de los típicos quesos de *ojos redondeados*. En la Figura 14.36 se ilustra una línea de proceso del queso Gouda.

La leche normalizada en grasa y pasteurizada se transforma en cuajada y suero de la forma usual en unas 2 horas. Normalmente, parte del calentamiento, o todo, se realiza por adición directa de agua caliente (50-60ºC) en una cantidad igual a 10-20% del volumen original de leche utilizada. Para hacer esto posible, se debe drenar primero el 20-30% del suero.

Una vez concluida la producción de cuajada, y el posterior drenado del suero hasta una proporción cuajada/suero de 1:3.5-4.0, se vacían los contenidos de la

cuba en un tanque pulmón (2) provisto de un agitador para conseguir una adecuada distribución de la cuajada en el suero. El tanque también posee una camisa para permitir el enfriamiento de la cuajada hasta 1-2°C con agua fría o helada, que puede ser necesaria durante ciertos períodos para reducción de la actividad del fermento.

La mezcla suero/cuajada se bombea desde el tanque pulmón lleno hasta una o más columnas de pre-prensado (3). Al comienzo del pre-prensado, sin embargo, la columna se llena primero con suero, normalmente el "segundo" suero procedente de la primera tina de cuajado que se va a vaciar, de forma que la cuajada no se exponga al aire cuando entre en la columna.

Para lograr una operación continua se debe manejar un adecuado número de cubas de forma secuencial que se vaciarán a intervalos regulares de unos 20-30 minutos.

Después del pre-prensado, un sistema de guillotinado que está situado en el fondo de cada columna corta un bloque de tamaño predeterminado, que después se empuja fuera de la máquina. Normalmente, los bloques caen por gravedad a los moldes limpios que vienen de la máquina de lavado y se estacionan justo debajo de las columnas. Un sistema totalmente mecanizado también comprende:

- el tapado mecánico (4) de los moldes
- la transferencia de los moldes hasta las prensas de cinta o de túnel con tiempos de prensado y presiones preprogramadas (5)
- llenado y vaciado de las prensas
- transporte de los moldes pasando por la estación de destapado (6), un dispositivo de volteo de moldes (7), un sistema de vaciado de moldes (8) y una balanza de pesado (9), hasta un sistema avanzado de salado (10).

Los moldes y las tapas se transportan por separado hasta una máquina combinada de lavado de moldes y tapas (12) antes de ser reutilizados.

Después del salado, el queso se almacena en una cámara de queso verde durante 10 días a 10-12°C, tras lo cual continua el almacenamiento en una cámara de maduración a 12-15°C durante unos 2-12 meses.

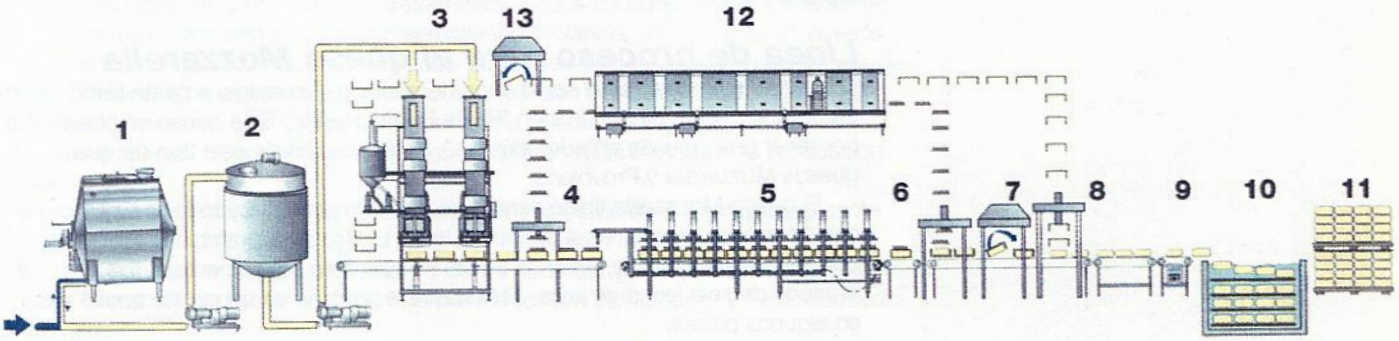


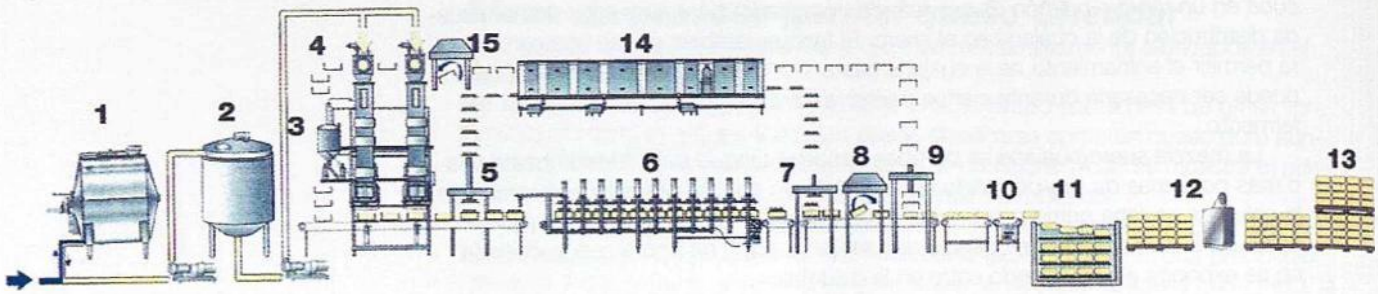
Fig. 14.36 *Diagrama de flujo del proceso de producción mecanizada de queso Gouda.*

1. *Cuba quesera*
2. *Tanque de regulación*
3. *Máquina Casomatic de pre-prensado*
4. *Tapado*
5. *Prensa de cinta*
6. *Destapado*
7. *Volteo de moldes*
8. *Vaciado de moldes*
9. *Pesado*
10. *Salado*
11. *Cámara de maduración*
12. *Lavado de moldes y tapas*
13. *Volteo de moldes*

Línea de proceso para queso Tilsiter

Este tipo de queso se ha elegido como representativo de los tipos de queso de textura granular. En la Figura 14.37 se muestra el principio de trabajo de una línea mecanizada de producción de este tipo de queso.

El pretratamiento de la leche y la producción de cuajada es similar al del queso Gouda. La primera diferencia básica es que cuando se llenan las columnas de pre-prensado, se separa la cuajada del suero justo antes de entrar en la columna. Esto se realiza en un equipo rotativo de drenado (4) localizado en la parte superior de la columna. De otra manera el esquema de producción es casi el mismo que el utilizado en el queso Gouda.



Leche
Cuajada/queso

Fig. 14.37 *Diagrama de flujo del proceso de producción mecanizada de queso Tilsiter.*
1. Cuba quesera
2. Tanque de regulación
3. Máquina Casomatic de pre-prensado
4. Escurridor rotatorio
5. Tapado
6. Prensa de cinta
7. Destapado
8. Volteo de moldes
9. Vaciado de moldes
10. Pesado
11. Salado
12. Cámara de fermentación con máquina de aplicación de recubrimiento
13. Cámara de maduración
14. Lavado de moldes y tapas
15. Volteo de moldes

Después del salado, sin embargo, el queso Tilsiter sufre un tratamiento especial que implica el recubrimiento de la superficie con un cultivo bacteriano utilizando una solución salina al 5% para conseguir su aroma característico. El queso Tilsiter es a continuación primero almacenado en una cámara de fermentación con humedad relativa elevada (90-95%) y a una temperatura de unos 14-16ºC. El procedimiento de embadurnado en superficie es manual o parcialmente mecanizado. El queso con recubrimiento es a continuación almacenado durante 10-12 días.

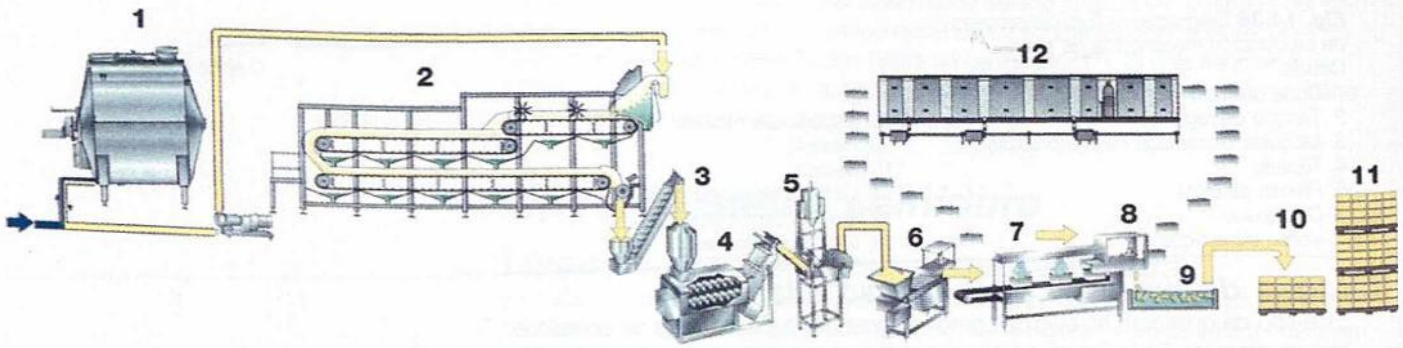
Después de sufrir el período de tratamiento en superficie el queso se envía a la cámara de maduración a 10-12ºC, normalmente después de haber pasado por una máquina de lavado. El tiempo en esta cámara es de unas 2-3 semanas.

A la salida de la cámara de maduración y durante la expedición, el queso Tilsiter se puede lavar y envolver en papel de aluminio antes de transferirse a una cámara fría a 6-10ºC.

Línea de proceso para el queso Mozzarella

El nombre en italiano para estos tipos de queso es "formagio a pasta filata", mientras que en inglés se denominan "Pasta Filata cheese". Este queso se caracteriza por tener una cuajada ahilada "elástica". Son ejemplos de este tipo de queso los quesos Mozzarella y Provolone.

El queso Mozzarella típico estaba hecho originalmente, y todavía hoy, con leche de búfalas criadas en el centro de Italia. El Mozzarella también se produce a partir de una mezcla de leche de búfala y vaca, pero actualmente la mayor parte procede de sólo leche de vaca. El Mozzarella también se denomina queso pizza en algunos paises.



Leche
Cuajada/queso

Fig. 14.38 *Diagrama de flujo del proceso de producción mecanizada de queso Mozzarella.*
1. Cuba quesera
2. Máquina de cheddarización
3. Tornillo transportador
4. Cocedor/estirador
5. Salado con sal seca
6. Multimoldes
7. Túnel de endurecimiento
8. Desmoldeado
9. Salado en salmuera
10. Paletización
11. Almacen
12. Lavado de moldes

La producción de Mozzarella normalmnete implica:

- la producción de cuajada de manera usual,
- la "cheddarización", incluyendo la molienda en hojas pero no el salado,
- cocción y estirado para obtener las características de ahilado y elástico,
- formado, endurecimiento y salado,
- envasado, por ejemplo en bolsas de plástico junto con alguna salmuera,
- corto almacenamiento antes de la expedición.

La Figura 14.38 ilustra el principio de trabajo de una línea de producción mecanizada.

La leche normalizada en grasa y pasteurizada se convierte en cuajada en la forma habitual. Después de ésto, la cuajada y el suero se bombean hasta una máquina de cheddarización mecanizada (2) más simple que la utilizada en la producción de queso Cheddar, donde la cuajada es amasada y molida en hojas. El proceso de amasado y molienda tiene lugar en unas 2-2.5 horas.

Tras la cheddarización las hojas se llevan por medio de un transportador de tornillo (3) a la tolva de un cocedor-estirador (4). A continuación, la cuajada plastificada se extrusiona en continuo para pasar a la máquina de moldeado (6), pudiendo ser salada en seco (5) de camino hacia ésta, para hacer más corto el tiempo de salado, que pasaría desde unas 8 horas hasta unas 2 horas.

La cuajada es trabajada en el (multi)-molde, que se lleva a continuación a través del túnel de endurecimiento donde el queso se enfría desde 65-70°C hasta 40-50°C rociando agua fría sobre los moldes. Al final del túnel los moldes pasan a un dispositivo de separación de moldes (8). El queso cae suavemente en un baño de salmuera fría (8-10°C) y los moldes fríos (11) se transportan hasta una máquina de lavado (12) desde la cual se retornan hasta la máquina de llenado.

El queso puede ser embolsado y envasado en cajas antes de ser cargado en palés que se llevarían a continuación hasta una cámara.

Tipos de queso semiduro, semiblando y blando

Algunas veces es difícil distinguir determinados tipos de queso como claramente semiduros o semiblandos, y como semiblando o blando, ya que muchos quesos presentan formas intermedias. Los tipos Tilsiter son típicamente representativos de las primeras formas intermedias, como son también tipos de queso Azul o Azul-veteado, mientras que los tipos de queso Brie pueden representar los últimos.

Las breves descripciones siguientes se refieren a los métodos de producción de:

- Queso Azul (veteado), representativo de los tipos de queso *semiduro* y *semiblando*, con formación de moho interior por *Penicillium roqueforti*.
- Queso Camembert, representativo de los tipos de queso *semiblando/blando* con formación de moho en superficie por *Penicillium camemberti* y *Penicillium candidum*.
- Queso Cottage y Quarg como representativos de los quesos *blandos* frescos.

Queso semiduro y semiblando

Queso azul veteado

El prototipo de queso azul veteado es el Roquefort, que tiene su origen en la comunidad de Roquefort en el Departamento de Aveyron, de Francia.

El queso Roquefort se produce a partir de leche de oveja. Si se utiliza otro tipo de leche en la producción de un queso similar no se debe denominar queso Roquefort. El queso azul veteado es el nombre genérico de los quesos que desarrollan en el interior un moho azul-verdoso.

Para imitar el aroma característico del queso Roquefort tanto como sea posible, la leche de vaca que se utilice se ha de homogeneizar parcialmente, por ejemplo mezclando leche desnatada con nata homogeneizada con un 20% de grasa. La razón es que la grasa que ha sufrido la homogeneización es más sensible a la influencia de las enzimas lipolíticas que segregan los mohos inoculados de *Penicillium roqueforti*.

Tras la normalización en grasa la leche normalmente se pasteuriza a unos 70°C, se enfría a 31-32°C y se lleva a la cuba de cuajado. Tras la adición de un

cultivo ordinario y una suspensión de esporas de *P. roqueforti*, la leche se agita para obtener una buena distribución de los microorganismos antes del cuajado.

El principio de producción de queso azul se muestra en un diagrama de bloques en la Figura 14.39. Como este diagrama

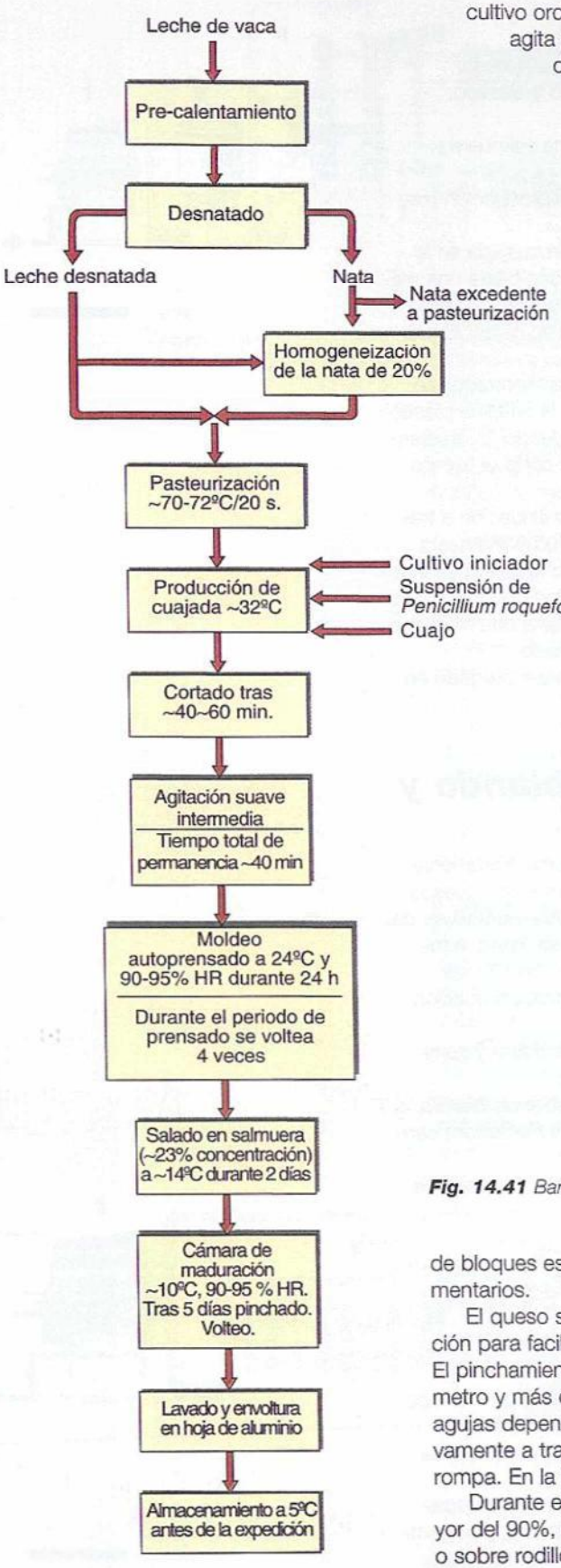


Fig. 14.39 *Principios de la producción de queso azul.*

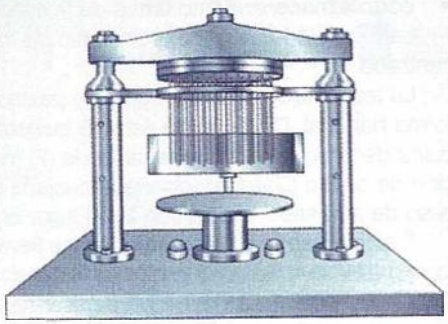


Fig. 14.40 *Máquina de pinchado de quesos azules.*

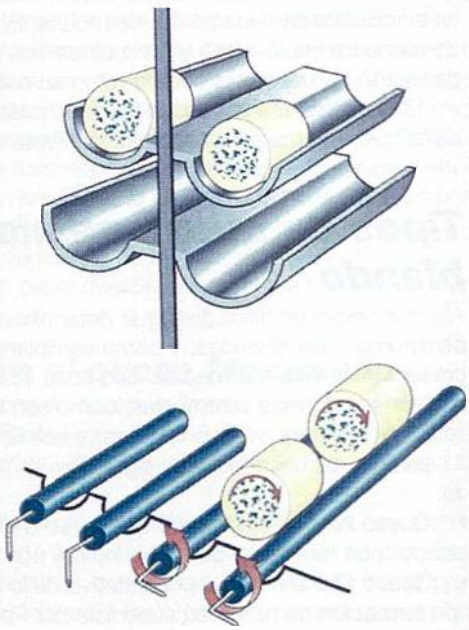


Fig. 14.41 *Bandejas adaptadas y rodillos giratorios para almacenamiento de queso azul.*

de bloques es suficientemente explícito, sólamente se harán aquí unos breves comentarios.

El queso se pincha después de 5 días de estancia en la cámara de maduración para facilitar la admisión del oxígeno necesario para el crecimiento del moho. El pinchamiento se hace con una herramienta con agujas de unos 2 mm de diámetro y más o menos con la misma longitud que la altura del queso. El número de agujas depende del diámetro del queso cilíndrico, que a veces se pincha alternativamente a través de la parte superior y por el fondo para evitar el riesgo de que se rompa. En la figura 14.40 se muestra una máquina de pinchado.

Durante el período de maduración de 5 a 8 semanas a 9-12ºC y a una HR mayor del 90%, el queso se mantiene sobre los bordes, normalmente sobre bandejas o sobre rodillos giratorios, tal como se muestra en la Figura 14.41. El último sistema facilita el girado del queso, que se hace frecuentemente para mantener la forma cilíndrica.

Después del período de pre-maduración el queso se pasa a través de una máquina de lavado para eliminar el recubrimiento superficial que normalmente se desarrolla a HR elevadas en la cámara, y el moho. Tras el lavado el queso normalmente se envuelve en papel de aluminio o película plástica antes de ser transferido

a la cámara a unos 5ºC, desde donde se expide a los almacenes minoristas después de un par de días.

Queso semiblando/blando

Queso Camembert

El queso Camembert puede servir como el tipo característico de queso recubierto por moho blanco de *Penicillium camemberti* y *Penicillium candidum*. El queso Brie es otro queso representativo.

El proceso de fabricación de queso es prácticamente el mismo que el queso azul veteado.

Los quesos son sin embargo pequeños y planos. El auto-prensado en los moldes se desarrolla durante unos 15-20 horas, durante el cual los quesos se han de voltear unas cuatro veces. Este queso es entonces salado durante 1-1.5 horas en salmuera saturada (con un 25% de sal).

Tras el salado, los quesos se colocan en bastidores de hilos de acero inoxidable, tal como se muestra en la Figura 14.42, o en bandejas. Los bastidores se apilan como mucho unos 15-20 en altura, y a continuación se transportan a las cámaras a 18ºC y 75-80% de HR donde se secan durante dos días. A continuación el queso se transporta a la cámara de maduración a 12-13ºC y 90% de HR.

Los quesos se voltean frecuentemente durante el período de maduración. Cuando se ha desarrollado suficientemente el moho blanco, normalmente tras 10-12 días, el queso se envasa en hojas de aluminio y se coloca a continuación en una caja antes de ser transferido a una cámara fría donde se mantiene a 2-4ºC en espera de la distribución a los minoristas.

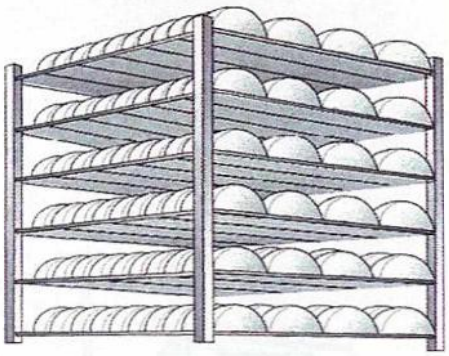


Fig. 14.42 *Bastidores de cuerdas para queso de cuajada blanca.*

Queso blando

Queso Cottage

El queso Cottage es una cuajada fresca y cremosa, baja en acidez ya que es continuamente lavada durante su fabricación.

Los fabricantes de queso Cottage pueden elegir entre tres maneras de fabricar un producto de idéntico carácter:

- método de estancia larga
- método de estancia media
- método de estancia corta

Las diferencias básicas entre estos métodos se resumen en la Tabla 14.4.

Independientemente del método, después del cortado la cuajada se deja reposar durante 15-35 minutos. En el cortado, el quesero normalmente realiza otra elección, es decir, entre producir queso Cottage de cuajada pequeña, cuajada de tamaño medio o cuajada grande, que está relacionada con la finura de los granos obtenidos en el cortado.

Después del período de reposo y agitación, la cuajada se cuece -normalmente con calentamiento indirecto- durante 1-3 horas hasta que se alcanza una temperatura de 47 a 56ºC.

Cuando se lleva a cabo la producción completa del queso Cottage en la misma tina, se drena un cierto volumen de suero para hacer sitio al correspondiente volumen de agua de lavado y enfriamiento.

De la misma manera, si se lleva a cabo la producción completa en la misma tina, la cuajada se lava normalmente con tres lotes de agua a temperaturas de 30, 16 y 4ºC respectivamente. Por medio del lavado se diluye la lactosa y el ácido lác-

Tabla 14.4
Datos de proceso para diferentes modos de producción de queso Cottage

Etapa de producción	Estancia larga	Estancia media	Estancia corta
Tiempo antes del cortado	14-16 horas	8 horas	5 horas
Temperatura de estancia de	22°C	26.5°C	32°C
Adición del cultivo	0.5%	3%	5%
Cuajo (fuerza 1:10^4)	2 ppm	2 ppm	2 ppm

tico, y posteriormente la producción de ácido y la contracción se detienen por enfriamiento de la cuajada hasta unos 4-5ºC. El tiempo total de lavado, incluyendo los períodos intermedios de drenado de suero-agua, es alrededor de 3 horas.

Una vez que se ha drenado toda el agua, se añade nata pasteurizada (80-90ºC) a 4ºC conteniendo una pequeña cantidad de sal, conocida como adobo, y se trabaja en continuo. El queso Cottage "Ordinario" contiene aproximadamente un 79% de humedad, 16% de sólidos lácteos no grasos, un 4% de grasa y un 1% de sal.

Finalmente, el queso Cottage se envasa y se almacena a 4-5ºC antes de ser distribuido para su venta al detalle.

Antes se ha comentado que el queso Cottage se puede fabricar en una simple tina. No obstante, se han desarrollado sistemas especiales de lavado y adición de

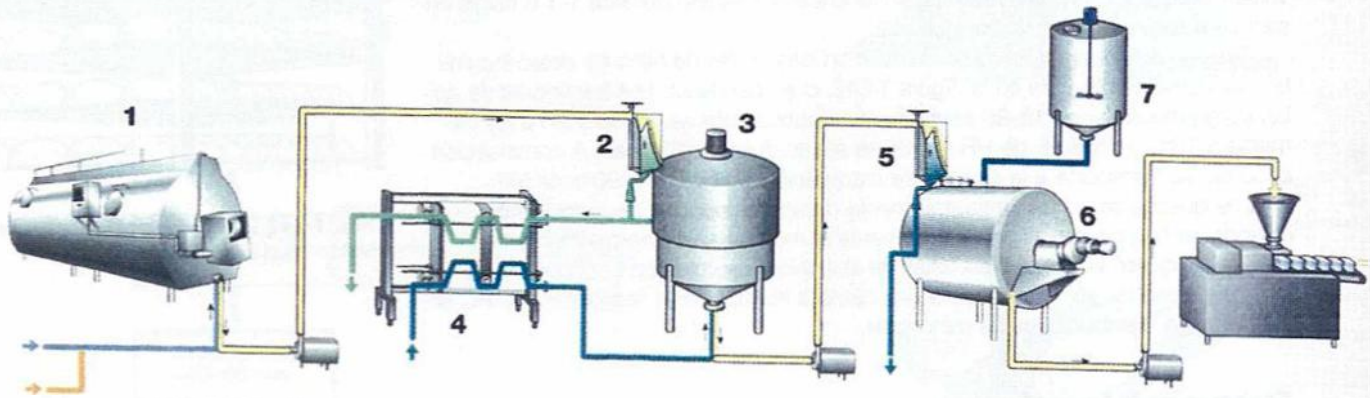


Fig. 14.43 *Diagrama de flujo del proceso de producción mecanizada de queso Cottage*
1. Cuba quesera
2. Escurridor de suero
3. Tanque de lavado y enfriamiento
4. Intercambiador de calor de placas
5. Escurridor de agua
6. Aplicadora de nata
7. Tanque de condimento
8. Máquina de llenado

nata para racionalizar la producción, especialmente el lavado de la cuajada y el adobado. El principio de una línea mecanizada de producción de queso Cottage se ilustra en la Figura 14.43.

A partir de la cuba cerrada (1) de producción de cuajada, que sirve entre otras cosas para proteger la leche de la infección que podría producir el aire ambiente durante el largo (16-20 horas) o relativamente corto (5 horas) período de coagulación, la mezcla de suero-cuajada se bombea a través de un escurridor estático de suero (2) hasta un tanque (3) de enfriamiento/lavado (EL).

Mientras que el suero se pasa a un tanque de recogida, la cuajada cae en el tanque EL con un cierto nivel de agua fresca. Antes de que toda la cuajada sea transferida desde la tina de cuajado hasta el tanque EL, se bombea agua fresca en éste a través de la entrada del fondo. A cierto nivel del tanque existe una salida para el exceso de líquido, que pasa a una parte interior, una parte perforada de forma que la cuajada sea retenida. Después de unos minutos, cuando el exceso de líquido está más o menos libre de suero, la entrada de agua se detiene y el agua se hace circular a través de un intercambiador de calor de placas (4), donde la temperatura se baja gradualmente hasta 3-4ºC. El procedimiento de lavado y enfriamiento total consume unos 30-60 minutos, sin incluir el llenado y vaciado del tanque EL.

Después del lavado y enfriamiento, la cuajada se bombea via el equipo de drenado (5) hasta un aplicador de nata (6) diseñado para el mezclado de la cuajada y la nata de adobo. Finalmente, el queso Cottage con nata se envasa.

Quarg

El Quarg se define como "un queso de cuajada ácida de leche desnatada que se consume normalmente sin madurar".

El Quarg a menudo se mezcla con nata, y a veces también con frutas y condimentos. El estandar del producto en los distintos paises y la materia seca referida a materia no grasa puede variar entre 14 y 24%.

Cuando se introdujo inicialmente la separadora de Quarg, la leche era pasteurizada a 73°C antes de la fermentación y la separación. Este se denomina el método tradicional.

Actualmente es más común utilizar la pasteurización alta-temperatura largotiempo de la leche desnatada, 85-95°C durante 5-15 minutos, y un tratamiento térmico posterior de la leche acidificada antes de la separación. El último método se denomina termización, recomendándose temperaturas entre 56 y 60°C durante unos 3 minutos. Esto, junto con la pasteurización a alta temperatura de la leche desnatada, contribuye a un mejor rendimiento.

En la Figura 14.44 se muestra una línea de producción de Quarg.

Después de la pasteurización y enfriamiento hasta 25-28°C, la leche se envía al tanque (1) donde se añade también un cultivo bacteriano, conteniendo normalmente bacterias *Streptococcus lactis/cremoris*, a menudo junto con una pequeña cantidad de cuajo, normalmente un décimo de lo que se utiliza en la producción de queso ordinario o unos 2 ml de cuajo líquido por cada 100 kg de leche. Esto consigue que se obtenga un coágulo más firme.

Se forma el coágulo después de unas 16 horas a pH 4.5-4.7. Después de agitarse el goágulo, comienza la producción de Quarg con la termización (2) y el enfriamiento a 37°C. El siguiente paso es la separación centrífuga (4). El Quarg sale de la máquina a través de boquillas situadas en la periferia del rotor y se descarga en un ciclón, desde el cual se envía mediante una bomba de desplazamiento positivo, via un enfriador de placas (5), hasta un tanque pulmón (6). El suero se recoge a la salida de la separadora.

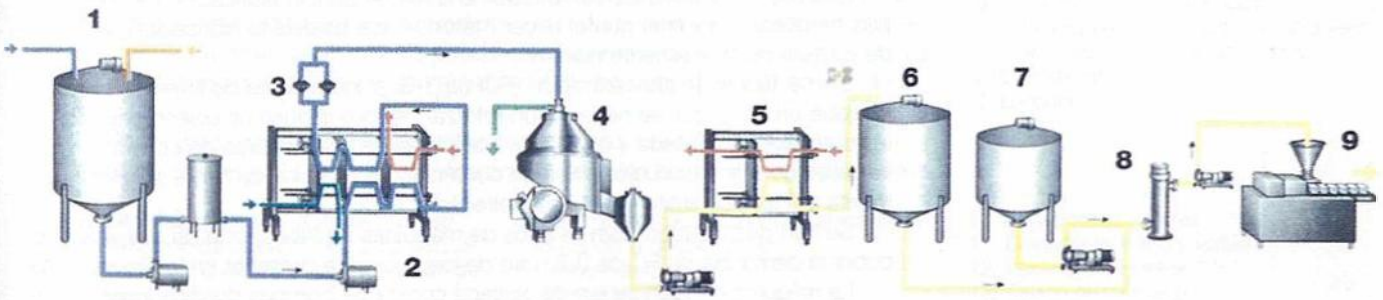


Fig. 14.44 *Diagrama de flujo del proceso de producción mecanizada de Quarg.*
1. Tanque de maduración
2. Intercambiador de calor de placas
3. Sistema de filtración
4. Separadora de Quarg
5. Intercambiador de calor de placas
6. Tanque intermedio
7. Tanque de nata
8. Mezcladora dinámica
9. Máquina de llenado

La temperatura de enfriamiento final depende del contenido de sólidos totales, y de hecho del contenido de proteinas. Con un contenido de materia seca de 16-19%, la temperatura alcanzable es 8-10°C. Cuando la materia seca es del 19-20%, el Quarg se ha de enfriar sólo hasta 11-12°C.

Los enfriadores tubulares se utilizan también, pero no son interesantes economicamente para pequeños volúmenes de producción debido a que las pérdidas de producto expresadas como porcentaje de la alimentación son altas, debido al gran volumen de mantenimiento del enfriador tubular.

El producto enfriado normalmente se recoge en un tanque pulmón antes de ser envasado.

Si se añade nata al Quarg, se añade un volumen adecuado de nata dulce o acidificada al caudal y después se mezcla en una unidad de mezclado dinámico (8) antes de que el producto vaya a la máquina de envasado (9).

A veces existe una demanda de producto Quarg de larga vida útil. El proceso incluye un tratamiento térmico del producto para inactivar todos los microorganismos. Se deben añadir estabilizantes adecuados en el tanque pulmón y se deben

distribuir continuamente por agitación. Se necesita estabilizar el sistema de proteínas antes del calentamiento final, que se lleva a cabo en un intercambiador de calor de placas, tubular o de superficie rascada.

La linea de proceso de Quarg señalada aquí puede también manejar la producción de yogur escurrido o Labneh, así como formar parte de una línea de procesado de queso de nata.

Ultrafiltración (UF) en la fabricación de queso

En el proceso de elaboración de quesos la UF se utiliza de tres formas distintas:

- La preconcentración a baja concentración, utilizando un factor de concentración (FC) de 1.5-2.0 para normalizar la relación proteina/grasa, es seguida por la elaboración del queso en un equipo convencional.
- Concentración moderada (FC= 3-5) y la elaboración posterior del queso según un proceso modificado, incluyendo algún drenaje de suero. El equipo utilizado difiere considerablemente del tradicionalmente utilizado.
- Concentración hasta alcanzar el contenido final de materia seca, al que la leche se trata primero por UF (factor de concentración FC = 6-8) para obtener un contenido de MS de un 35%, seguida por un tratamiento a vacío para alcanzar el contenido típico de MS del queso en cuestión.

Los dos primeros métodos pueden emplearse para la fabricación de varios tipos de queso, mientras que el tercer método hace posible la fabricación de tipos de quesos completamente nuevos.

Con el factor de concentración (FC) de 3-5, el incremento de firmeza de la cuajada provoca que se necesite un reforzamiento o incluso un diseño especial de los utensilios de cortado y agitación. Los utensilios tradicionales de cortado son capaces de manejar cuajada con un contenido de proteina de hasta aproximadamente el 7%, que limita el FC hasta alrededor de 2.

Se han desarrollado nuevos tipos de máquinas de fabricación de cuajada para cubrir la demanda de FC de 3-5, uno de los cuales se presenta en la Figura 14.45.

La máquina de fabricación de cuajada consta de bombas dosificadoras (1), un grupo de válvulas (3), mezcladores estáticos (2), un conjunto de tuberías de coagulación (4), y una unidad de corte (5).

Desde las bombas dosificadoras la mezcla de retentato, cuajo y fermento se distribuye a las tuberías de coagulación. Una máquina estándar de este tipo tiene cuatro tuberías de coagulación en espiral que van protegidas por una capa de aislamiento y una pared de acero inoxidable. El aislamiento se necesita para mantener la correcta temperatura de cuajado.

El retentato, el cuajo y el cultivo se introducen en la planta mediante las bombas y se mezclan en continuo antes de entrar en la tubería 1. Mientras que la mezcla se deja en coagulación, la tubería 2 se llena y posteriormente las tuberías 3 y

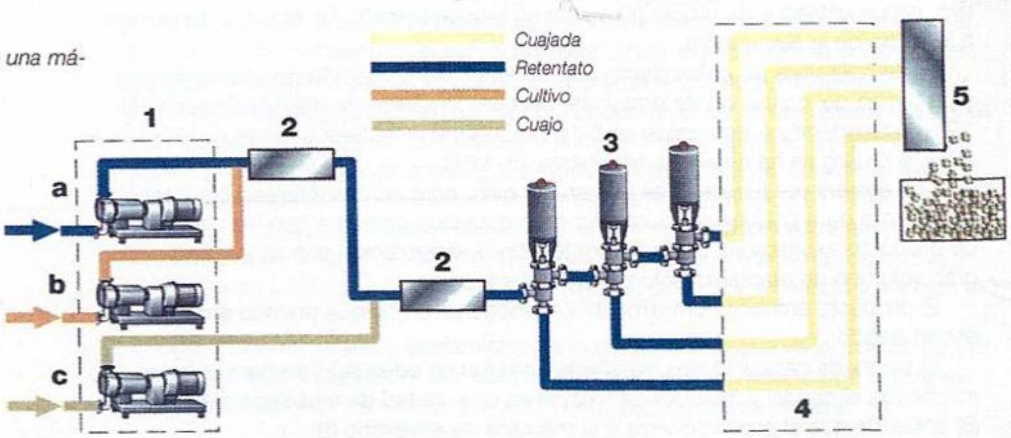


Fig. 14.45 *Principio de trabajo de una máquina de elaboración de cuajada.*
1. Bombas de dosificación para:
a. retentato
b.cultivo
c. solución de cuajo
2. Mezcladora estática
3. Válvulas
4. Coagulador
5. Unidad de corte de la cuajada

4. El contenido de la tubería 1 está coagulado y listo para la descarga cuando la tubería 4 esté llena. El tiempo de coagulación en las tuberías es controlado por medio de la velocidad de la bomba dosificadora.

Las tuberías de coagulación acaban en la unidad de cortado, que consta de conjuntos de cuchillas estacionarias y una cuchilla rotativa (Figura 14.46). La "masa" de cuajada se prensa a través de cuchillas estacionarias para formar tiras de queso. En la siguiente etapa las tiras de cuajada se cortan mediante una cuchilla rotatoria para formar cubos, que se envían hacia el siguiente equipo. A continuación se someten al tratamiento necesario según el tipo de queso que se esté fabricando.

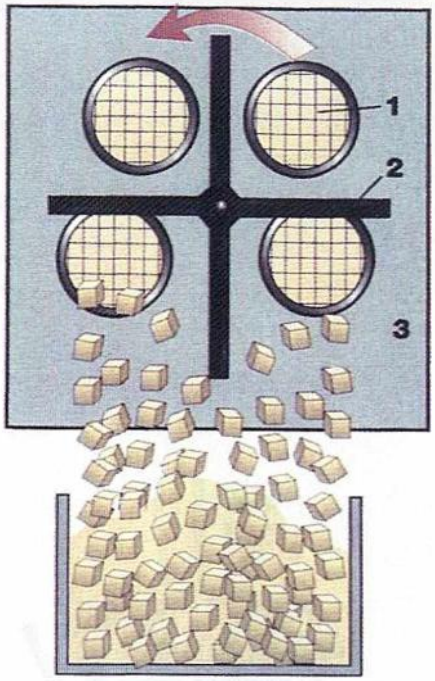


Fig. 14.46 *Unidad de cortado en una máquina de fabricación de cuajada.*
1. Extremos de tuberías con cuchillas verticales y horizontales estacionarias
2. Cuchilla rotativa
3. Bastidor

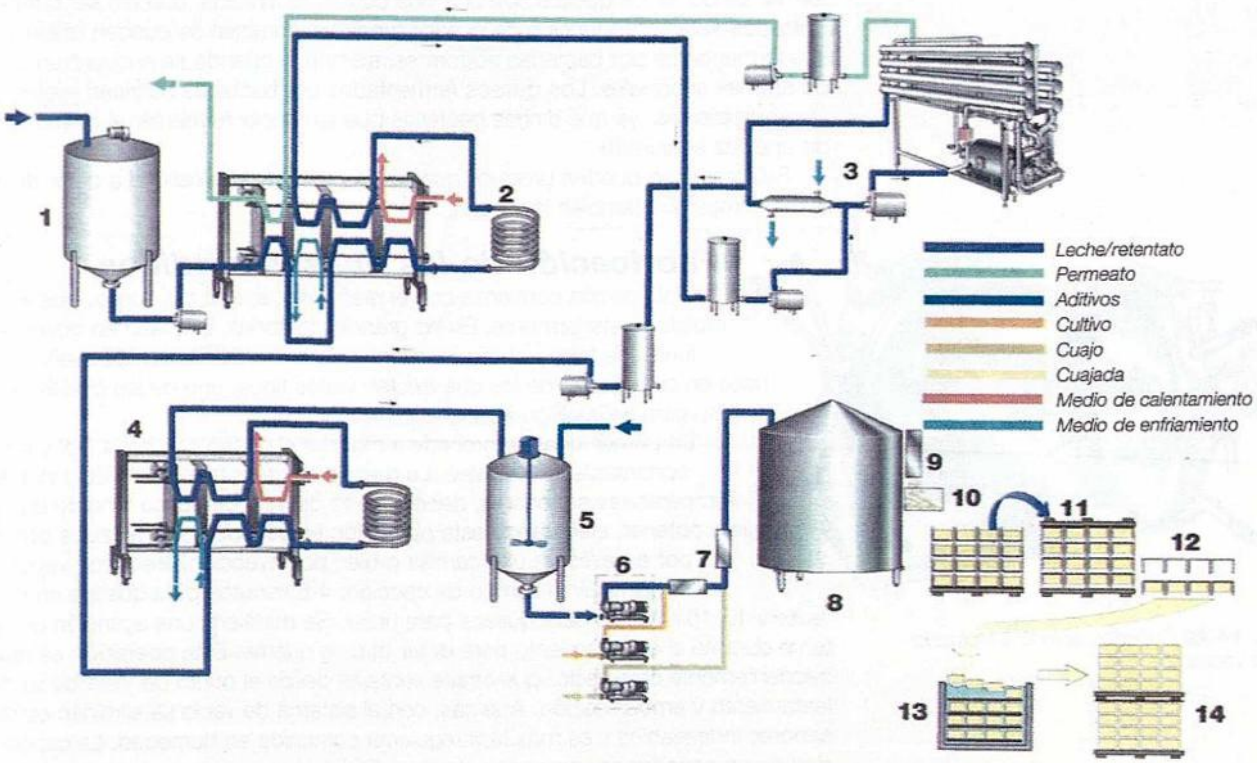
Fabricación de queso utilizando UF y la máquina de fabricación de cuajada

Tanto los tipos de queso de ojos redondeados, como los granulares y los de textura cerrada, pueden fabricarse mediante la utilización de la ultrafiltración en combinación con una máquina de producción de cuajada del tipo descrito. El equipo situado a continuación de dicha máquina es especial para cada tipo de queso. En la Figura 14.47 se indica una línea de producción de queso tipo Tilsiter.

Los tratamientos previos de la leche son los mismos que en el sistema tradicional; por ejemplo, es sometida a una pasteurización a 72ºC durante 15 segundos. Para algunos tipos de queso, la leche se acidifica hasta un pH de 6.0-6.3. Después, se concentra en la unidad UF hasta un factor de concentración FC = 3-5. Esto quiere decir que se alcanza un contenido de sólidos totales del 25-40 %. La lactosa puede separarse por lavado con agua durante la UF. De este modo, el contenido en lactosa de la cuajada puede ser regulado y el pH controlado. Esto es necesario en los quesos en los que el valor del pH no debe caer por debajo de 5.1.

El permeato contiene únicamente lactosa, algunas sales minerales y componentes no proteicos. El retentato (concentrado) se enfría hasta la temperatura de

Fig. 14.47 *Diagrama de flujo del proceso de producción de queso Tilsiter utilizando ultrafiltración y una máquina de elaboración de cuajada.*
1. Tanque de leche
2. Pretratamiento, incl. termización
3. Módulo de ultrafiltración
4. Tratamientos posteriores del retentato incluyendo la pasteurización
5. Tanque de mezclado
6. Bomba dosificadora
7. Mezcladorres estáticos
8. Máquina de elaboración de cuajada
9. Unidad de corte de la cuajada
10. Llenadora de moldes
11. Drenado de suero y volteo
12. Vaciado de moldes
13. Salado en salmuera
14. Cámara de maduración



adición del cuajo, 20-38ºC, dependiendo del tipo de queso. Dicho concentrado pasa a través de la máquina de producción de cuajada (8), siendo descargado en forma de cubos de queso (9) en un sistema de moldeo (10). Durante el periodo de prensado por gravedad el queso se voltea varias veces. Eventualmente el queso puede ser mecánicamente prensado durante corto tiempo -10 a 15 minutos- antes de separar los moldes.

Normalmente, el queso se sala en salmuera para adquirir un contenido de sal de 1.6-1.8%, que en el caso de quesos de 4 kg sumergidos en un baño de sal del 20-30% a 10-12ºC consumirá aproximadamente 30 horas.

Cuando el queso se ha salado se transfiere a un almacenamiento a 16ºC y una HR del 90%. El tratamiento en superficie, y el posterior tratamiento también, es similar al anteriormente descrito para el queso Tilsiter fabricado de forma tradicional.

Nuevas tendencias

La concentración de la leche para queso en una planta UF diseñada para un FC de 6-8, seguida de una posterior concentración por tratamiento a vacío del retentato (concentrado) hasta el mismo contenido de MS del queso, ofrece nuevas oportunidades para racionalizar la producción. Tales métodos también limitan fuertemente las pérdidas de grasa y proteinas.

Fig. 14.48 *Cocedor para queso fundido.*

Quesos fundidos

El queso fundido se fabrica a partir de quesos acabados, generalmente una mezcla de variedades duras con diferentes aromas y grados de madurez. Existen dos tipos de quesos fundidos:

- Queso fundido en bloques de consistencia firme, de acidez elevada y con un contenido en humedad relativamente bajo.
- Queso para untar, con una consistencia blanda, baja acidez y elevado contenido en humedad.

Se les pueden añadir diversos aromatizantes. En este tipo de quesos se pueden incluir también variedades con sabor a ahumado.

El queso fundido contiene normalmente un 30 o 45% de grasa sobre el contenido total de sólidos, aunque también se elaboran variedades de quesos fundidos con mayor o menor contenido en grasa que los citados. En todos los demás aspectos, su composición depende enteramente del contenido en humedad y de las materias primas utilizadas en su fabricación.

El queso para fundir es de la misma calidad que el queso utilizado para el consumo directo. Los quesos con defectos en su superficie, color, textura, tamaño y forma, así como los quesos con una vida comercial limitada, pueden ser también utilizados para la producción de quesos fundidos. También se pueden utilizar quesos fermentados por bacterias coliformes, siempre y cuando se encuentren libres de aromas anormales. Los quesos fermentados por bacterias butíricas suelen provocar problemas, ya que dichas bacterias pueden hacer fermentar al queso fundido una vez elaborado.

Solamente se pueden producir quesos fundidos de alta calidad a partir de materias primas que también la tengan.

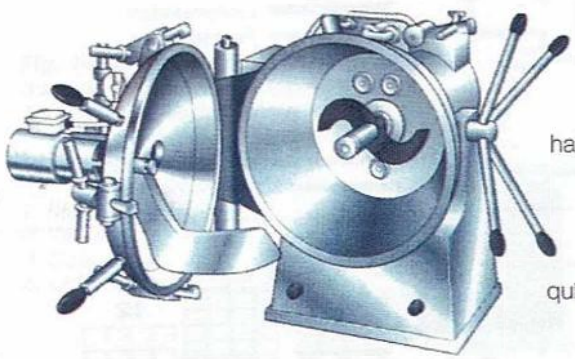


Fig. 14.49 *Cocedor, abierto e inclinado para vaciado.*

Fabricación de los quesos fundidos

La fabricación comienza con el raspado y lavado del queso, que es molido posteriormente. En las grandes factorías, el queso en trozos se funde de forma continua, mientras que en las fábricas pequeñas se hace en cocedores, de los que existen varios tipos, uno de los cuales se muestra en las Figuras 14.48 y 14.49.

En primer lugar se procede a mezclar el queso con agua, sal y emulsionantes/estabilizantes. La mezcla se calienta a 70-95ºC, o incluso a temperaturas superiores, dependiendo del tipo de queso fundido que se quiera obtener, efectuando esta operación en cocedores calentados por vapor a través de una camisa o bien por inyección directa de vapor para disminuir el tiempo de cocción, 4-5 minutos para quesos en bloques y 10-15 minutos para quesos para untar. Se mantiene una agitación constante durante el calentamiento para evitar que se queme. Esta operación se realiza frecuentemente bajo vacío, que ofrece ventajas desde el punto de vista de su calentamiento y emulsificación. Además, con el sistema de vacío se eliminan olores y sabores indeseables y es más fácil regular el contenido en humedad. La capacidad de un cocedor por cargas es de unos 75 kg.

El pH del queso fundido debe ser de 5.6-5.9 para el tipo de untar y de 5.4-5.6 para los tipos que se presentarán en lonchas. Las variaciones que puedan presentar en el pH las materias primas se pueden ajustar mezclando quesos de diferentes pH y añadiendo emulsionantes/estabilizadores para ajustar dicho pH. El emulsionante/estabilizante también tiene la capacidad de ligar calcio. Esto es necesario para estabilizar el queso de forma que no suelte humedad o grasa.

El queso fundido se descarga entonces del cocedor y pasa a un envase de acero inoxidable que se lleva hasta la sección de envasado y se vacía en las tolvas de alimentación de las máquinas de envasado. Estas últimas suelen ser totalmente automáticas y pueden producir envases de diferentes pesos y formas.

Normalmente, el queso fundido se envasa en caliente, y a la misma temperatura que sale del cocedor.

El tipo de queso fundido para untar debe ser enfriado tan rápidamente como sea posible a través de un túnel de enfriamiento, después de haberse envasado. De esta forma se mejoran sus propiedades para untar.

El queso fundido que se presenta en barras o bloques, por otro lado, se debe enfriar lentamente. Tras el moldeado el queso se deja a temperatura ambiente.

Capítulo 15

Procesado del lactosuero

El suero, el residuo líquido de la producción de queso y caseina, es una de las mayores reservas de proteinas alimentarias que aún permanecen fuera de los canales de consumo humano. La producción mundial de suero, aproximadamente unos 120 millones de toneladas en 1990, contieneunos 0.7 millones de toneladas de proteinas de relativamente alto valor, igual al contenido de proteinas de casi 2 millones de toneladas de habas de soja. Sin embargo, y a pesar de la falta crónica de proteinas en gran parte del mundo, una proporción muy considerable de la producción total de lactosuero se vierte como residuo - la proporción de vertido era aproximadamente el 50% en 1989-1990.

El suero representa el 80-90% del volumen total de la leche que entra en el proceso y contiene alrededor del 50% de los nutrientes de la leche original: protei-

nas solubles, lactosa, vitaminas y sales minerales. El suero, como subproducto de la elaboración de quesos blandos, duros o semiduros y de la producción de caseína de cuajo, es conocido como suero dulce y tiene un pH de 5.9-6.6. La fabricación de caseina precipitada por ácidos minerales da lugar a un suero ácido con un pH de 4.3-4.6. La Tabla 15.1 muestra las cifras de composición aproximada del suero procedente de la elaboración de quesos y de la fabricación de caseina.

Tabla 15.1
Composición aproximada del lactosuero, %

Constituyente	Suero de queso %	Suero de caseina %
Sólidos totales	6.4	6.5
Agua	93.6	93.5
Grasa	0.05	0.04
Proteina	0.55	0.55
NNP (nitrógeno no protéico)	0.18	0.18
Lactosa	4.8	4.9
Cenizas (sales minerales)	0.5	0.8
Calcio	0.043	0.12
Fósforo	0.040	0.065
Sodio	0.050	0.050
Potasio	0.16	0.16
Cloruro	0.11	0.11
Ácido láctico	0.05	0.4

Tabla 15.2
Ejemplos de utilización del lactosuero y productos del mismo.

Producto del lactosuero	Lactosuero	Lactosuero concentrado o en polvo					Seroproteinas concentradas o en polvo				Lactosa	
	Lactosuero líquido	*Natural*	*Azucarado*	*Desmineralizado*	*Desproteinizado*	*Deslactosado*	*Desmineralizado*	*Deslactosado*	*Desmineralizado y*	*Deslactosado*	*Cruda*	*Refinada*
Alimentación natural	•	•		•	•	•						
Consumo humano												
Alimentos infantiles				•			•	•	•			•
Alimentos dietéticos				•			•	•	•		•	•
Salchichas				•			•					
Sopas		•	•	•								
Productos de pastelería	•	•		•			•					
Salsas de ensalada		•		•								
Productos para untar/queso de lactosuero		•										
Queso fundido natural		•		•								
Bebidas	•								•			
Dulces		•	•	•								•
Productos farmacéuticos												•
Productos de levadura	•											
Productos industriales											•	•

El suero se diluye muy a menudo con agua. Las cifras anteriores se refieren a suero sin diluir. Como en la composición de la fracción NNP, alrededor del 30% consiste en urea. El resto son aminoácidos y péptidos (gluco macro péptidos a partir de la acción del cuajo sobre la caseina). La Tabla 15.2 relaciona algunos campos de aplicación del suero y los productos del lactosuero.

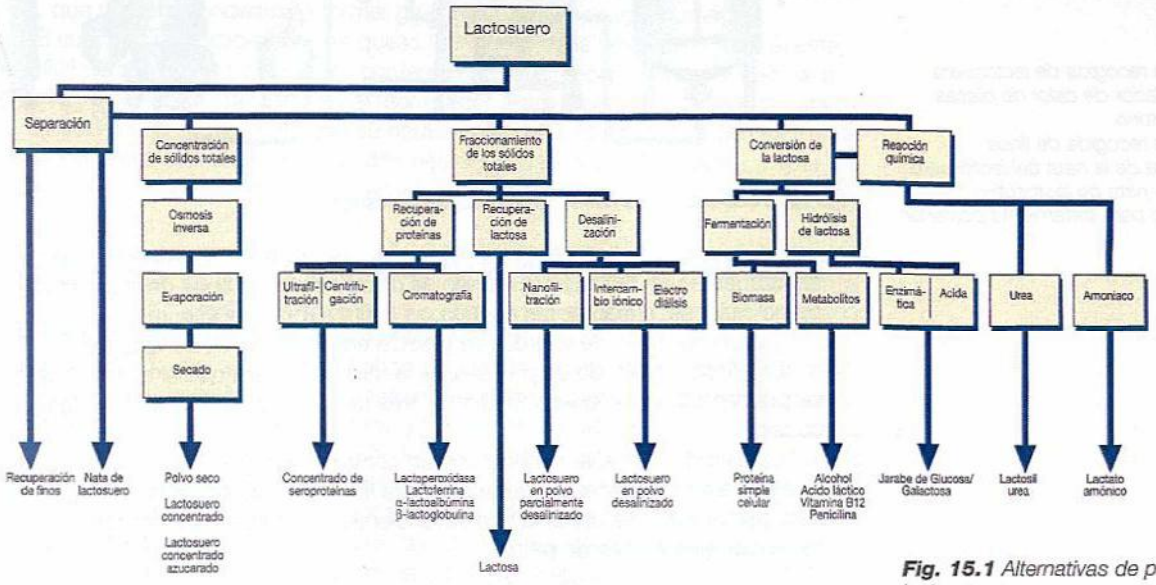


Fig. 15.1 *Alternativas de procesado del lactosuero.*

Aunque el suero contiene nutrientes valiosos, sólo recientemente se han desarrollado nuevos procesos comerciales para la fabricación de productos de alta calidad a partir de dicho suero.

El diagrama de bloques de la Figura 15.1 da un resumen de los diversos procesos utilizados en el tratamiento del suero y los productos finales obtenidos a partir del mismo. Independientemente del tratamiento posterior del suero, la primera etapa que se efectúa es la separación de la grasa y de los finos de caseina (Figura 15.2). Ello se hace en parte para aumentar el rendimiento económico y también porque los citados constituyentes interfieren con los tratamientos posteriores.

Los procesos que predominan son los de obtención de suero en polvo, suero en polvo desmineralizado, lactosa y suero en polvo deslactosado. Sin embargo, se está produciendo un cambio gradual hacia nuevos e interesantes productos a partir del suero. Es presumible que estos nuevos productos y procesos transformarán la imagen del suero, considerado como un subproducto no deseado, y pasará a ser una importante materia prima para la fabricación de productos de calidad. Algunos de los procesos que se utilizan en la actualidad son descritos en este capítulo.

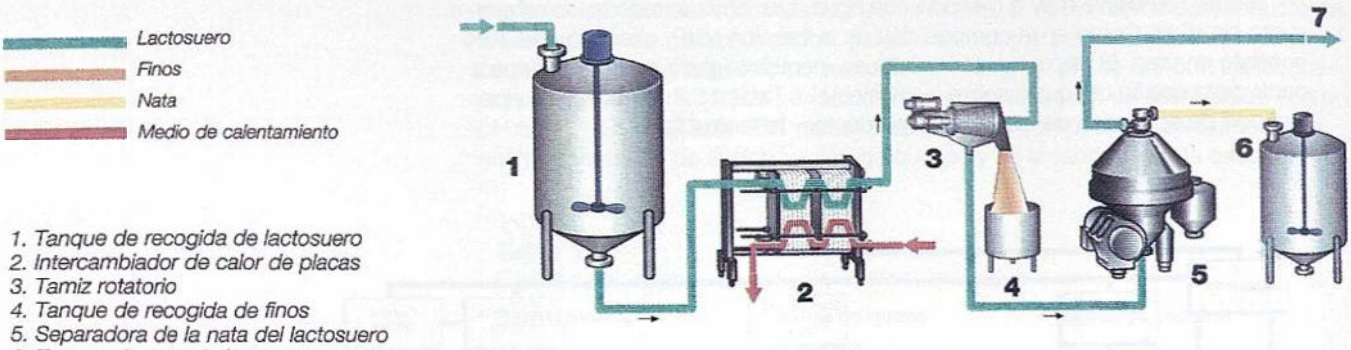
Diferentes tratamientos del suero

El suero debe ser procesado tan pronto como sea posible después de su recogida, ya que su temperatura y composición promueven el crecimiento de bacterias. Si no es así, el suero debe enfriarse rapidamente hasta unos 5ºC para detener eventualmente el crecimiento bacteriano.

Si está permitido legalmente, el suero se puede conservar mediante la adición de bisulfito sódico, normalmente se añade un 0.4% calculado como dióxido de azufre (SO_2), o peróxido de hidrógeno (H_2O_2), normalmente como solución al 0.2% de una solución de H_2O_2 al 30%.

Recuperación de finos de caseina y separación de la grasa

En el suero siempre se encuentran presentes finas partículas de caseina. Estas tienen un efecto adverso en el proceso de separación de la grasa, por eso deben ser



1. Tanque de recogida de lactosuero
2. Intercambiador de calor de placas
3. Tamiz rotatorio
4. Tanque de recogida de finos
5. Separadora de la nata del lactosuero
6. Tanque de nata de lactosuero
7. Lactosuero para tratamiento posterior

Fig. 15.2 *Separación de finos y grasa del lactosuero.*

separadas en primer lugar. Para ello se utilizan diversos tipos de dispositivos, tales como ciclones, separadoras centrífugas o filtros rotativos (Figura 15.2).

La recuperación de la grasa se efectúa en separadoras centrifugas.

Los finos a menudo se prensan de la misma manera que el queso, tras lo cual se pueden utilizar en queso fundido y, tras un período de maduración, también en cocción.

La nata de suero, a menudo con un contenido de grasa de 25-30%, puede ser reutilizada en la fabricación de queso para la normalización de la leche para queso. Esto permite que se utilice la correspondiente cantidad de nata fresca en productos especiales a base de nata.

Enfriamiento y pasteurización

El suero que va a ser almacenado antes de su tratamiento debe ser enfriado o pasteurizado tan pronto como se separa la grasa contenida en el mismo. Cuando el almacenamiento va a ser corto (10-15 horas), el enfriamiento es suficiente para reducir la actividad bacteriana. Si va a estar almacenado por periodos de tiempo más largos es necesario proceder a su pasteurización.

Concentración de los sólidos totales

Concentración

La concentración del suero tradicionalmente se viene realizando a vacío en un *evaporador* de película descendente con dos o más efectos. Desde mediados de los años 70 se han venido utilizando evaporadores hasta de 7 efectos, con objeto de compensar el aumento en los costes energéticos. En la mayor parte de los evaporadores se han introducido los sistemas de compresión térmica y mecánica del vapor para reducir aún más los costes de evaporación.

En muchas industrias se han instalado plantas de ósmosis inversa (OI) de diseño tubular para efectuar una preconcentración antes de que el suero se devuelva a las granjas o se envíe a un evaporador donde se realizaría la concentración final.

Después de alcanzar un contenido en sólidos totales del 45-65%, el concentrado se enfría rápidamente hasta unos 30ºC en un intercambiador de calor de placas, y se pasa a un depósito encamisado (con tres camisas) para su posterior enfriamiento a 15-20ºC acompañado con una constante agitación. Dicha agitación debe continuar durante 6-8 horas con objeto de obtener cristales de las menores dimensiones posibles, que pueda dar lugar a un producto no higroscópico cuando se seque por atomización.

El suero concentrado es una solución sobresaturada de lactosa y, bajo ciertas condiciones de temperatura y concentración, la lactosa puede algunas veces cristalizar antes de que el suero abandone el evaporador. Con concentraciones de MS superiores al 65 %, el producto puede volverse tan viscoso que no pueda fluir.

Para más información sobre la OI y los evaporadores se puede ver el Capítulo 6, secciones 6.4 y 6.5.

Secado

Básicamente, el suero se seca de la misma forma que la leche, es decir, en secaderos de tambor o atomizadores (vease el capítulo 17, sobre leche en polvo).

La utilización de secaderos de tambor presenta un problema: es difícil rascar la capa de suero seco que se forma sobre la superficie de dicho tambor. Por ello, se

procede a mezclar con el suero antes de su secado salvado de trigo o centeno para facilitar el rascado del producto seco.

En la actualidad, el método más utilizado para el secado del suero es la atomización. Antes de ser secado, el concentrado de suero se suele someter a un tratamiento térmico, tal como se ha indicado anteriormente, con el fin de formar pequeños cristales de lactosa, lo que hace que se obtenga un producto no higroscópico, que no tiene tendencia a formar grumos cuando absorbe humedad.

El suero ácido, procedente de queso Cottage o de la producción de caseina, es difícil de secar debido a su alto contenido en ácido láctico. Tiene tendencia a formar grumos y aglomerados en el atomizador. Para facilitar el secado de este tipo de suero se puede proceder a su neutralización o a la adición de productos tales como leche desnatada y productos derivados de los cereales, aunque este tipo de suero no se procesa actualmente.

Fraccionamiento de los sólidos totales

Recuperacion de las proteínas

Las proteinas del lactosuero se aislaban originalmente por medio del uso de distintas técnicas de precipitación, pero actualmente se utilizan los procesos de separación por membranas (fraccionamiento) y procesos cromatográficos, además de las técnicas de precipitación y formación de complejos. El proceso más extensamente utilizado en la separación de las proteinas del lactosuero es la desnaturalización por calor. La proteina precipitada a causa de este proceso es o bien insoluble o escasamente soluble dependiendo de las condiciones que prevalecen durante la desnaturalización. Se denomina proteina de suero precipitada por calor (PSPC).

Fink y Kessler (1988) indicaron que se puede alcanzar un ratio máximo de desnaturalización de proteina de lactosuero del 90% para todas las fracciones desnaturalizables. La peptona proteosa, que supone un 10% de la fracción, se considera no desnaturalizable.

Las proteinas propias del suero, como constituyentes del suero en polvo, se pueden producir facilmente mediante un secado cuidadoso del suero. Debido a su desfavorable composición, estas proteinas tienen sólo una aplicación limitada en alimentos (sólo tienen un 11% de proteina y un alto contenido de lactosa y cenizas). Por lo anterior se ha desarrollado el aislamiento de las proteinas propias del lactosuero. Estas proteinas obtenidas por separación con membranas o intercambio iónico tienen unas buenas propiedades funcionales, solubilidad, formación de espuma, formación de emulsiones y gelificación.

Recuperación de proteínas por medio de la ultrafiltración (UF)

Los concentrados de proteinas propias del suero tienen un muy buen perfil de aminoácidos con altas proporciones de lisina y cisteina asimilable.

Los concentrados de seroproteina (CSP) se presentan como polvo fabricado mediante secado del retentato de la ultrafiltración del suero. Se describen en términos de su contenido en proteina, % de proteina sobre materia seca, oscilando

Tabla 15.3

Composición del lactosuero y del retentato y permeato obtenidos.

Componente	Peso en 100 kg Lactosuero ordinario		Peso en 17 kg Retentato		Peso en 83 kg Permeato	
	kg	%	kg	%	kg	%
Proteina	0.55	0.55	0.55	3.24	0	0
Lactosa	4.80	4.80	0.82	4.82	3.98	4.80
Cenizas	0.80	0.80	0.14	0.82	0.66	0.80
NNP*	0.18	0.18	0.03	0.18	0.15	0.18
Grasa	0.03	0.03	0.03	0.18	0	0
MS total	6.36	6.36	1.57	9.24	4.79	5.78

* NNP = Nitrógeno no protéico

entre 35% y 85%. Para fabricar un producto con un 35% de proteína el suero líquido se concentra unas 6 veces hasta un contenido de sólidos totales aproximadamente del 9%.

Ejemplo: 100 kg de suero da lugar a 17 kg de retentato, con cerca de 6 (5.88) veces su concentración, y 83 kg de permeato. La Tabla 15.3 muestra la composición del alimento (el suero) y del retentato y permeato resultantes.

El % de proteína sobre materia seca de acuerdo con los valores de la Tabla 15.3 sería:

$$\frac{100 \times 0.55}{1.57} = 35$$

En la concentación se retiene la mayoría de las proteínas puras, normalmente >99%, junto con casi el 100% de la grasa. La concentración de lactosa, NNP y cenizas son las mismas en el retentato y en el permeato, como en el suero inicial, aunque parece que tiene lugar una ligera retención de estos componentes. Las cifras de retención global, sin embargo dependen mucho de:

- El tipo de membrana
- El caudal
- El caracter del alimento (prediluido con agua, preconcentrado tras desmineralización, etc.)

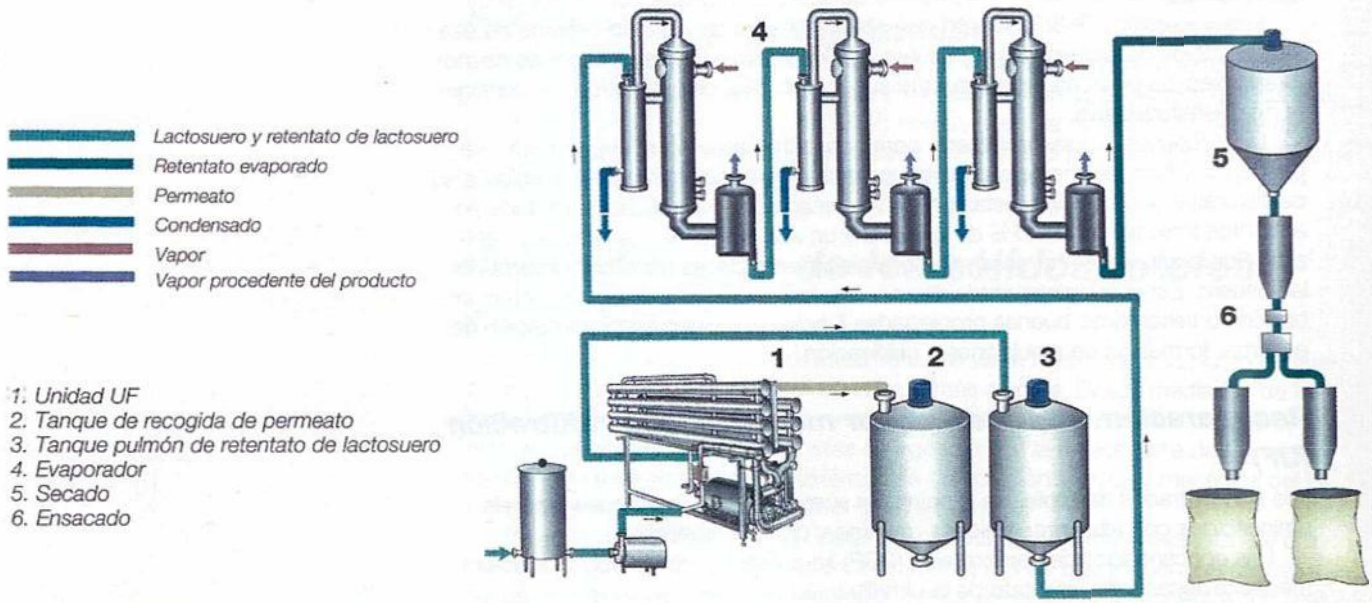


Fig. 15.3 *Proceso de recuperación de un concentrado deshidratado de proteína utilizando la UF.*

Para obtener un concentrado con un 85% de proteína el suero líquido se concentra primero unas 20-30 veces mediante ultrafiltración hasta un contenido de sólidos de aproximadamente 25%. Este valor se considera como el máximo para una operación económica. Es entonces necesario diafiltrar el concentrado para eliminar más lactosa y cenizas y aumentar la concentración de proteína con relación a la materia seca total. La diafiltración es un proceso en el que el agua se añade al alimento conforme se realiza la filtración con el fin de lavar los componentes de bajo peso molecular que pasarán a través de la membrana, básicamente lactosa y sales minerales.

La Tabla 15.4 muestra la composición de algunos típicos concentrados de proteína de suero (CPS) en polvo.

En la Figura 15.3 se muestra una línea de proceso para la fabricación de proteínas desecadas utilizando la UF. Aproximadamente el 95% del suero se recoge como permeato, de forma que se pueden obtener en el producto seco concentraciones de proteínas tan altas como 80-85% (calculadas sobre contenido de MS).

Tabla 15.4
Composición en % de algunos concentrados en polvo de seroproteinas.

Producto	1	2	3	4
Proteina en materia seca	35	50	65	80
Humedad	4.6	4.3	4.2	4.0
Proteina cruda (Nx6.38)	36.2	52.1	63.0	81.0
Proteina	29.7	40.9	59.4	75.0
Lactosa	46.5	30.9	21.1	3.5
Grasa	2.1	3.7	5.6	7.2
Cenizas	7.8	6.4	3.9	3.1
Acido láctico	2.8	2.6	2.2	1.2

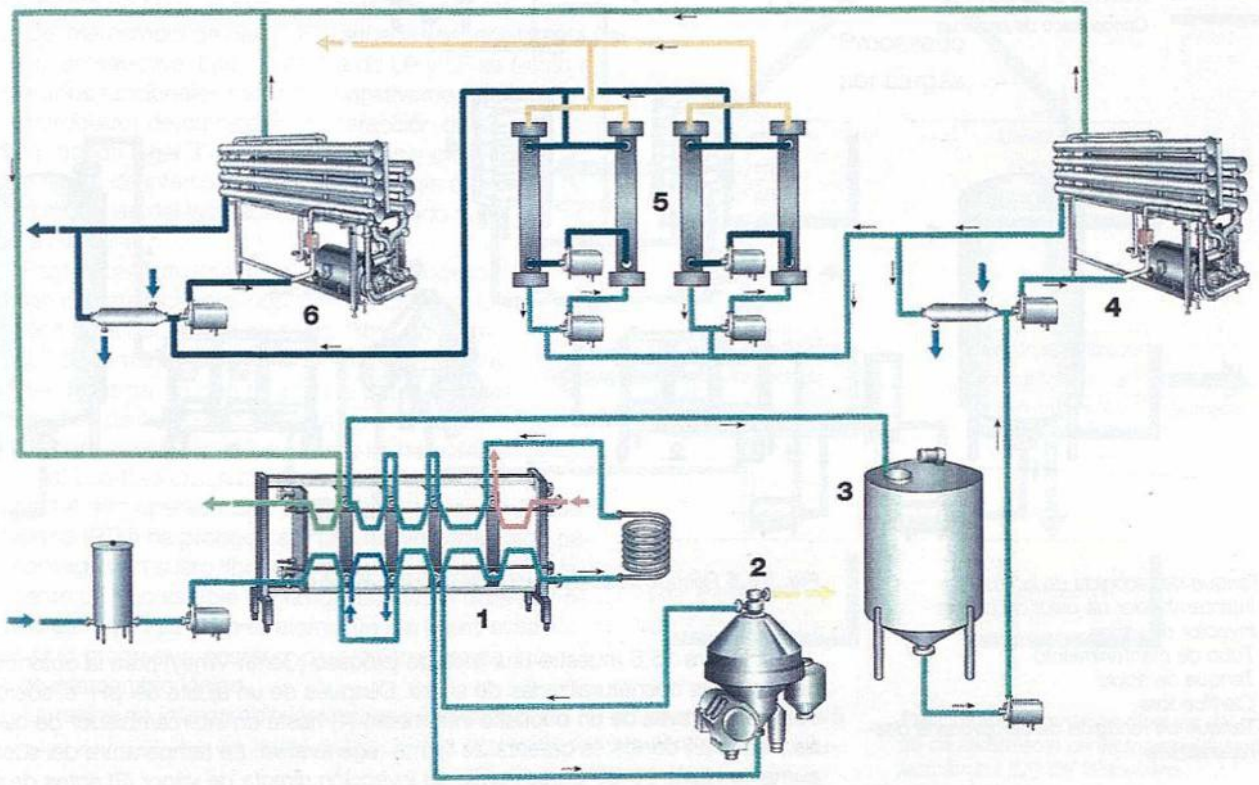
Especificación de producto:
1. Sustituto de leche desnatada, 35% de proteina en materia seca
2. Suplemento protéico para otros alimentos, 50% de proteina en materia seca
3. Límite práctico de proteina obtenida sólo mediante ultrafiltración, 65% de proteina en materia seca
4. Producto de ultrafiltración más diafiltración, 80% de proteina en materia seca.

En el capítulo 6.4, sobre filtros de membranas, se dan más detalles referentes al sistema de ultrafiltración.

Desengrasado del concentrado de proteinas de suero (CPS)

El concentrado de proteinas de suero sin grasa en polvo, conteniendo un 80-95% de proteina sobre materia seca, es una opción muy interesante para algunas aplicaciones. Por ejemplo, para reemplazar la clara de huevo en productos batidos, tales como merengues, y como ingrediente en distintos alimentos y bebidas de frutas.

El tratamiento del retentato de suero a partir de una planta UF en una planta de microfiltración (MF) puede reducir el contenido de grasa del CPS 80-85% en polvo desde el 7.2% hasta menos del 0.4%. La microfiltración también concentra las membranas de los glóbulos de grasa y la mayoría de las bacterias en el retentato de MF, que se recoge y se elimina de forma separada. El permeato MF desengrasado se envía a una segunda planta UF para una posterior concentración. Esta etapa también incluye la diafiltración.



1. *Pasteurizador*
2. *Separadora de nata de lactosuero*
3. *Tanque de mantenimiento*
4. *Primera planta UF*
5. *Planta MF*
6. *Segunda planta UF*

Fig. 15.4 *Proceso para desengrasado del retentato de seroproteinas.*

Tal como se muestra en la Figura 15.4, el suero se precalienta (1) y se desnata (2) para recuperar tanta grasa como sea posible en forma de nata 25-30%. Esta nata se puede reutilizar en la normalización en grasa de la leche para queso. Esta etapa de separación también elimina finos. Después de esto, el suero se pasteuriza (1) y se enfría hasta alrededor de 55-60°C antes de ser transferido a un tanque de mantenimiento intermedio.

Tras un tiempo de mantenimiento, el suero se bombea hasta una primera planta UF (4), donde se concentra unas tres veces. El retentato se bombea hasta la planta MF (5), mientras que el permeato va a un tanque de recogida tras el enfriamiento regenerativo (1).

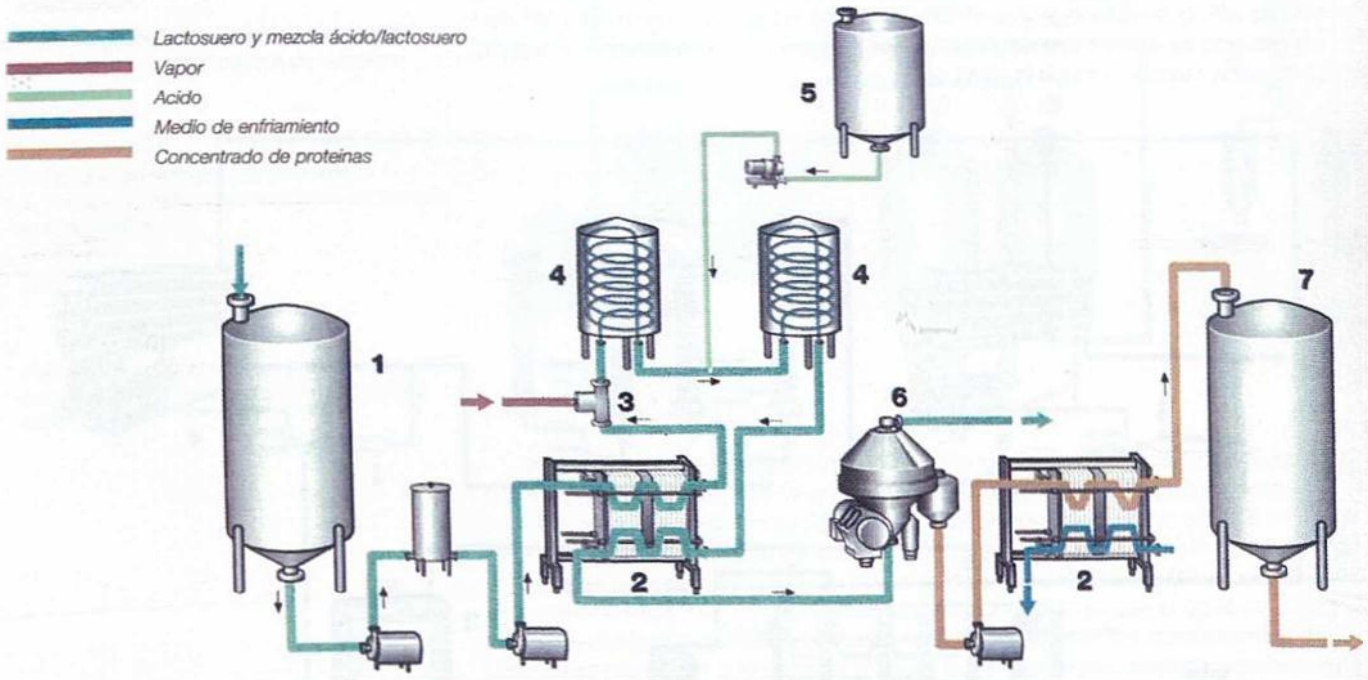
El retentato procedente del tratamiento MF, que contiene la mayor parte de la grasa y de las bacterias, se recoge separadamente, y el permeato desengrasado se envía hacia una posterior ultrafiltración con diafiltración (6). El CPS resultante con un 20-25% de MS es entonces atomizado para reducir el contenido de humedad hasta un máximo de 4% antes de envasarse en bolsas o sacos.

Recuperación de las proteinas desnaturalizadas del suero

De forma general, se puede decir que las proteínas del suero no pueden ser precipitadas por el cuajo o por ácidos. Sin embargo, es posible precipitar dichas proteínas con ácidos si primero se desnaturalizan por calor. El proceso se divide en dos etapas:

- Precipitación (desnaturalización) de las proteinas por medio de una combinación de tratamiento térmico y ajuste del pH.
- Concentración de las proteinas por separación centrífuga.

Las proteinas desnaturalizadas del suero pueden mezclarse con leche destinada a la elaboración de quesos antes de la aplicación del cuajo; son entonces retenidas en la estructura formada por las moléculas de caseina durante la coagulación. Este descubrimiento hizo que se realizaran intensos esfuerzos con objeto de encontrar un método de precipitación y separación de las proteinas del suero, así como una técnica para optimizar el rendimiento, conservando las características del queso en lo referente a aroma y textura.



1. *Tanque de recogida de lactosuero*
2. *Intercambiador de calor de placas*
3. *Inyector de vapor*
4. *Tubo de mantenimiento*
5. *Tanque de ácido*
6. *Clarificadora*
7. *Tanque de recogida de seroproteina desnaturalizada*

Fig. 15.5 *Recuperación de seroproteinas desnaturalizadas.*

La Figura 15.5 muestra una linea de proceso (Centri-Whey) para la obtención de proteinas desnaturalizadas de suero. Después de un ajuste del pH, el suero se bombea a través de un depósito intermedio (1) hasta un intercambiador de calor de placas (2) donde se calienta de forma regenerativa. La temperatura del suero aumenta hasta 90-95°C por medio de inyección directa de vapor (3) antes de su

paso a una sección tubular de mantenimiento (4) con un tiempo de mantenimiento de 3-4 minutos. Durante esta etapa se introduce ácido en el suero para reducir el valor de su pH. El ácido utilizado puede ser orgánico o inorgánico (por ejemplo ácido láctico o ácido clorhídrico de uso en alimentación), según se estipule.

Aquellas proteinas que pueden ser, y han sido, modificadas por el calor precipitan en unos 60 segundos en la sección tubular de mantenimiento (4).

Después de un enfriamiento regenerativo a unos 40°C, las proteinas precipitadas se separan de la fase líquida en una centrífuga clarificadora de eyección de sólidos (6). La máquina descarga las proteinas acumuladas a intervalos de unos 3 minutos en la forma de un concentrado a 12-15% del cual el 8-10% es proteina. Con este método se consigue una recuperación de proteinas coagulables del 90-95%.

La adición de proteinas concentradas de suero a la leche que se va a utilizar en la elaboración de quesos (principalmente en los blandos y semiduros) provoca únicamente pequeños cambios en las propiedades de coagulación. La estructura del coágulo se hace más fina y más uniforme que en los métodos convencionales. Las proteinas procesadas del suero son más hidrófilas que la caseina. En la fabricación de queso Camembert, por ejemplo, se consigue un incremento en el rendimiento del 12%.

Aislamiento cromatográfico de lactoperoxidasa y lactoferrina

En general, el uso de los agentes bioactivos es de gran interés en los productos como alimentos infantiles, alimentos sanos, cremas para la piel y pastas de dientes. Ejemplos de tales componentes son las proteinas bioactivas lactoperoxidasa (LP) y lactoferrina (LF) que se presentan como componentes minoritarios en el suero, normalmente del orden de 20 mg/l de LP y 35 mg/l de LF. La Swedish Dairies Association (SMR) ha desarrollado un proceso patentado basado en la cromatografía para el aislamiento de estas proteinas a partir de suero de fabricación de queso a escala industrial.

El principio básico sobre el que se desarrolló el proceso es el hecho de que tanto la LP como la LF tienen puntos isoeléctricos en la zona alcalina de pH, 9.0-9.5, lo que significa que estas proteinas están cargadas positivamente a pH normal del suero dulce, 6.2-6.6, mientras que el resto de las proteinas del suero, como la β-lactoglobulina, α-lactoalbúmina y la albúmina de suero bovino están cargadas negativamente en el mismo rango de pH. Un proceso básicamente deseable para el aislamiento de LP y LF será entonces hacer pasar el suero por resinas de intercambio de cationes diseñadas especialmente para la adsorción selectiva. Las moléculas de LP y LF se fijarán a los grupos funcionales cargados negativamente del intercambiador de cationes por interacción de carga, dando lugar a la fijación de estas moléculas en la resina de intercambio iónico, mientras que las otras proteinas del lactosuero pasan debido a su carga negativa.

Para hacer industrialmente viable el proceso, se han de satisfacer algunos criterios básicos. Uno de ellos es la necesidad de suero "libre de partículas", para mantener un caudal elevado durante la fase de carga, ya que tienen que pasar grandes volúmenes de suero por la resina de intercambio iónico para conseguir la saturación. La microfiltración (MF) de flujo cruzado con un tamaño de poro de 1.4 mm operada bajo una presión transmembranar uniforme (PTU) ha probado ser una técnica adecuada para conseguir un suero libre de partículas. Se mantiene fácilmente un flujo estable de 1200-1500 l/m²h durante 15-16 horas. Este tipo de pretratamiento del suero evita el aumento progresivo posterior de presión sobre la columna de intercambio iónico.

La resina de intercambio iónico tiene una capacidad de adsorber juntas 40-45 g de LP y LF por litro de resina antes de que ocurra la colmatación. Con un volu-

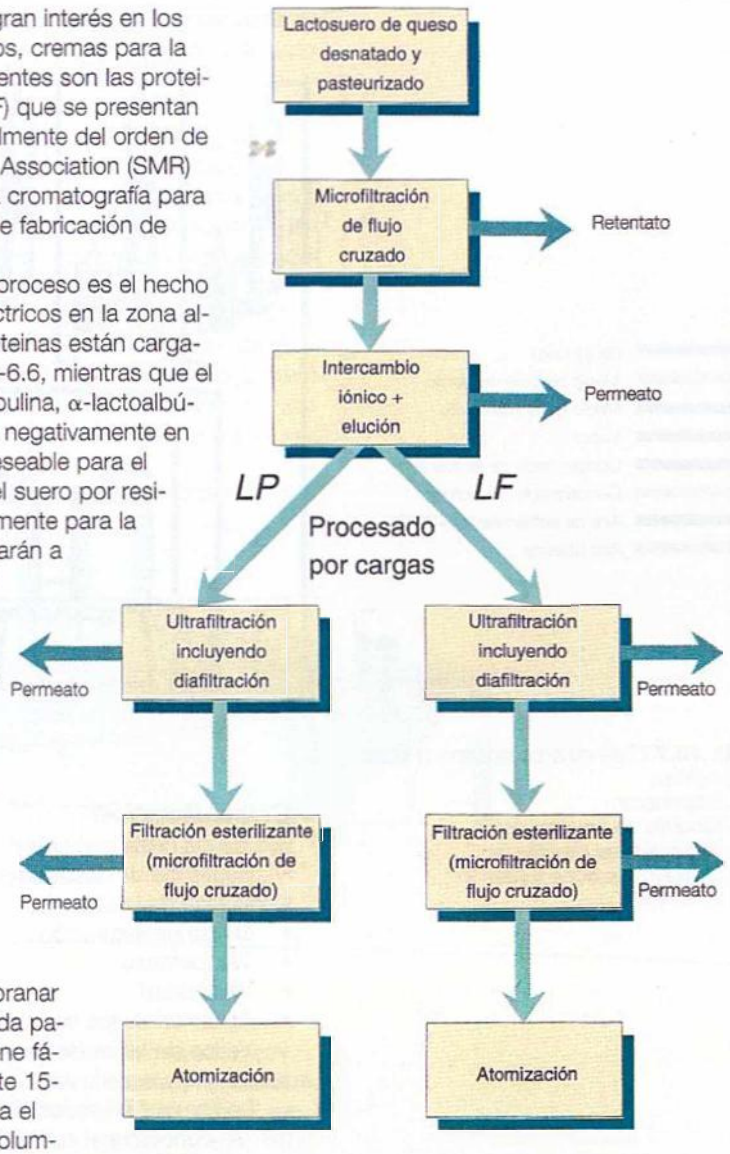


Fig. 15.6 *Diagrama de bloques del proceso de aislamiento de lactoperoxidasa (LP) y lactoferrina (LF) del lactosuero.*

men de lecho de resina de 100 l se pueden tratar unos 100.000 l de suero por ciclo.

Con la elección apropiada de las condiciones de elución de las proteinas bioactivas adsorbidas sobre la columna es posible obtener fracciones muy puras de LP y LF. En este paso se utilizan soluciones salinas de diferente concentración. Las proteinas en el eluyente se presentan en una forma débilmente concentrada, del orden de 1% en peso. De esta manera, el paso de intercambio iónico concentra la LP y LF por un factor de casi 500 si se compara con el suero inicial. El posterior procesado del eluyente mediante UF y diafiltración da lugar a un producto de proteina muy puro, con una pureza de aproximadamente el 95%. Finalmente, tras una filtración esterilizante en una planta MF de flujo cruzado con poros de 0.1-0.2 μm, los concentrados de proteina son atomizados. El proceso global se ilustra en la Figura 15.6.

Recuperación de la lactosa

La lactosa es el principal constituyente del suero. Según el tipo de materia prima, se pueden utilizar dos métodos para la recuperación de esta sustancia:

- Cristalización de la lactosa en suero sin tratar, pero concentrado.
- Cristalización de la lactosa en suero desproteinizado por ultrafiltración o por algún otro método, antes de la concentración.

Ambos métodos dan lugar a unas melazas que pueden ser secadas y utilizadas como pienso. El valor del pienso puede aumentarse considerablemente si las melazas son desalinizadas y si se procede a la adición de proteinas de alta calidad.

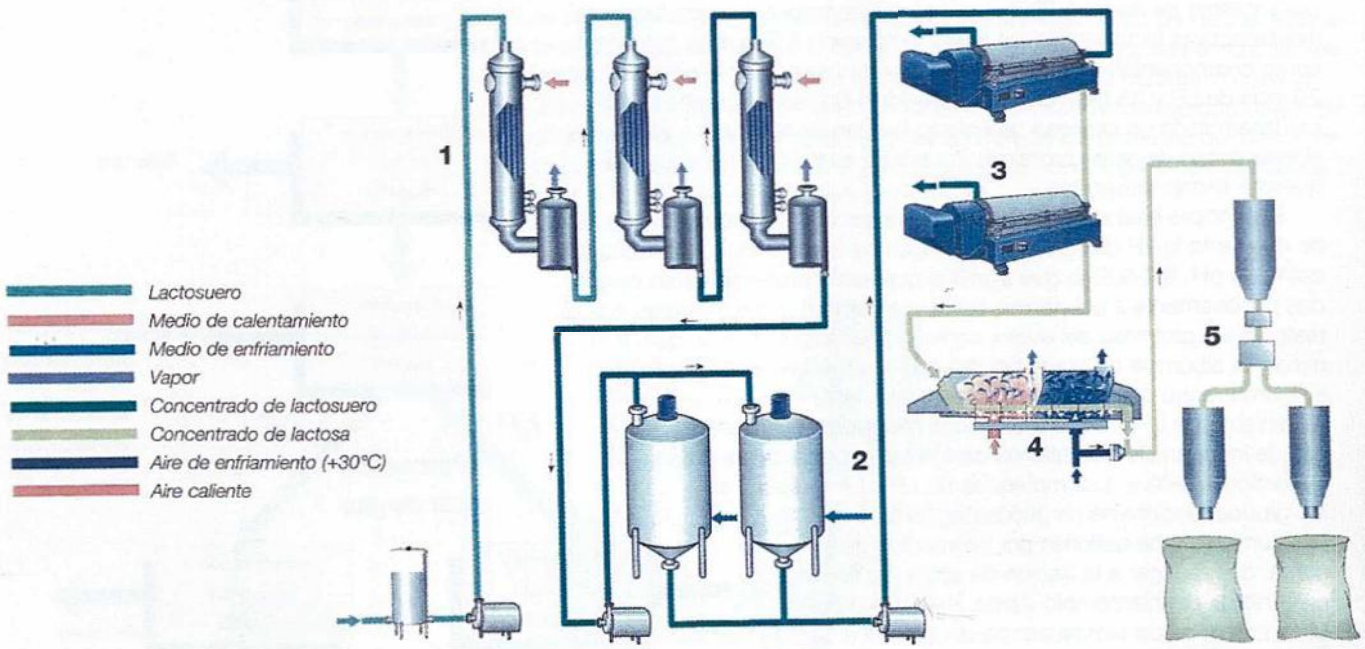


Fig. 15.7 *Línea de proceso para la fabricación de lactosa.*
1. Evaporador
2. Tanques de cristalización
3. Decantadoras centrífugas
4. Secadero de leche fluidizado
5. Envasado

Cristalización

El ciclo de cristalización está determinado por los siguientes factores:

- Superficie de cristal disponible para el crecimiento
- Pureza de la solución
- Grado de saturación
- Temperatura
- Viscosidad
- Agitación de los cristales en la solución

Varios de estos factores están relacionados entre sí, por ejemplo el grado de saturación y la viscosidad.

La Figura 15.7 muestra una línea para la producción de lactosa. En primer lugar, se concentra el suero por evaporación hasta un contenido de MS del 60-62%, pasando entonces a los depósitos de cristalización (2) donde se añaden semillas de cristales que actuarán como núcleos de cristalización. La cristalización tiene lugar de forma lenta, de acuerdo con un programa prefijado de tiempos y

temperaturas. Los depósitos tienen camisas de enfriamiento y equipo para el control de la temperatura de enfriamiento. También están equipados con agitadores especiales.

Después de la cristalización, la melaza de cristales pasa a decantadores centrífugos (3) para separación de los cristales, que son secados (4) hasta alcanzar la forma de polvo, y después se muelen, normalmente en un molino de martillos, se tamizan y la lactosa se envasa (5).

Para conseguir una separación simple y eficaz de los cristales de lactosa del licor madre, la cristalización debe hacerse de forma que el tamaño de dichos cristales sea superior a 0.2 mm, ya que cuanto mayores sean, mejor se puede efectuar la separación de los mismos.

El grado de cristalización viene en principio determinado por la cantidad de β-lactosa convertida a la forma buscada de α-lactosa, por lo que el enfriamiento del concentrado debe ser controlado y optimizado de forma cuidadosa.

Separación de la lactosa

Se pueden utilizar varios tipos de centrífugas para la recogida de los cristales de lactosa. Así, se emplean decantadoras centrífugas horizontales (Figura 15.8), que trabajan de forma continua y tienen un tornillo transportador para la descarga de la lactosa. Se instalan dos máquinas en serie. La lactosa de la primera es vuelta a procesar en la segunda, con objeto de conseguir una separacion más eficiente. Durante la separación, las impurezas de la lactosa se eliminan por lavado, de forma que se obtiene un alto grado de pureza. El contenido residual de humedad de la lactosa después de la segunda etapa de separación es inferior al 9%, y la lactosa pura representa cerca del 99% de los sólidos totales secos.

Secado

Después de la separación se procede al secado de la lactosa hasta alcanzar un contenido residual de humedad del 0.1-0.5%, dependiendo de la utilización que se le vaya a dar al producto. La temperatura durante el secado no debe superar los 93°C, ya que se forma β-lactosa a temperaturas superiores. El tiempo de secado debe ser también tomado en consideración. Durante el secado rápido tiende a formarse una delgada capa de lactosa amorfa (no cristalina o sin forma) sobre los cristales α-hidratos, lo que puede dar lugar posteriormente a la formación de grumos. El secado se realiza normalmente en un secador de lecho fluidizado. La temperatura se mantiene a 92°C y el tiempo de secado es de 15-20 minutos. El transporte del azúcar seco se realiza por aire a una temperatura de 30°C, que a su vez enfría al azúcar.

Los cristales se muelen hasta la forma de polvo inmediatamente después del secado y, a continuación, se envasan.

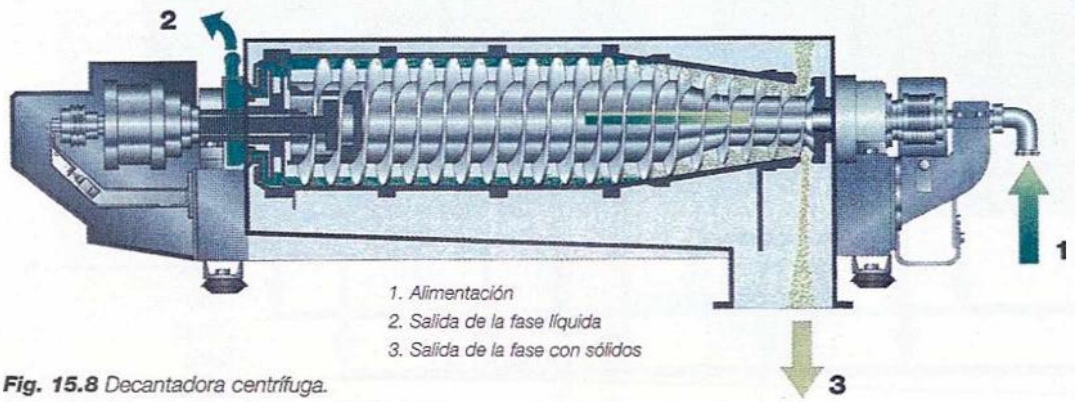


Fig. 15.8 *Decantadora centrífuga.*

Refino de la lactosa

En algunas aplicaciones, como en los procesos de fabricación farmacéuticos, es necesario un más alto grado de pureza. Por ello, la lactosa utilizada en estas aplicaciones debe ser refinada después de su obtención. Durante el proceso de refino, la lactosa se redisuelve en agua caliente hasta una concentración del 50%. Al mismo tiempo se añade carbón activo, fosfato y un agente filtrante. Después de la filtración, la solución de lactosa pasa al depósito de cristalización, donde se realiza nuevamente este proceso. La lactosa purificada es entonces separada, secada, molida y envasada.

Desmineralización (Desalinización)

Como el suero tiene un relativamente alto contenido de sal, alrededor del 8-12% calculado sobre peso seco, su aplicación como ingrediente en alimentos humanos es limitada. Por medio de la desmineralización del suero se pueden abrir varios campos de aplicación del mismo, como suero parcialmente desmineralizado (25-30%) o suero muy desmineralizado (90-95%).

El suero concentrado *parcialmente* desmineralizado se puede utilizar por ejemplo en la fabricación de helados de crema y productos de panificación o incluso en Quarg, mientras que el concentrado de suero muy desmineralizado, en polvo o no, se puede utilizar en formulaciones de alimentos infantiles y, desde luego, en un amplio abanico de otros productos.

Principios de la desmineralización

La desmineralización implica la eliminación de sales inorgánicas junto con cierta reducción del contenido de iones orgánicos tales como lactatos y citratos.

La desmineralización parcial se basa principalmente en la utilización de membranas de flujo cruzado especialmente diseñadas para retener especies de partículas que tienen un radio en el rango de nanometros (10^{-9} m). Este tipo de filtración se denomina nanofiltración (NF).

El *elevado* grado de desalinización se basa en una de estas dos técnicas:

- Electrodiálisis
- Intercambio iónico

Desmineralización parcial por NF

Por medio del uso de membranas de OI de poro muy pequeño, y especialmente diseñadas, pequeñas partículas como ciertos iones monovalentes, por ejemplo sodio, potasio, cloruro, y pequeñas moléculas orgánicas como urea y ácido láctico, pueden escapar a través de la membrana junto con el permeato acuoso. Este proceso de membrana se conoce por distintos nombres, tales como ultraósmosis y nanofiltración (NF).

Debido a que son más compactas, las *membranas enrolladas en espiral* son las que más a menudo se utilizan en las nuevas instalaciones de hoy en día (1994). Para más información sobre este tipo de membranas ver el Capítulo 6.4, Filtros de membrana.

En la Tabla 15.5 se dan ejemplos de ratios de permeación de los constituyentes de un suero dulce normal durante la nanofiltración.

Tal como se muestra en la tabla, la reducción del contenido de cloruro en el suero dulce puede ser tan alta como del 70% y en cuanto al sodio y potasio la reducción puede ser del 30-35%. La razón de esta diferencia en la eliminación de iones es la necesidad de mantener un equilibrio electroquímico entre iones negativos y positivos.

Tabla 15.5

Velocidades de permeación de los constituyentes de lactosuero dulce normal durante la nanofiltración.

Condiciones		**Reducción**	**%**
MS final	22%	Potasio	31
Factor de concentración	4x	Sodio	33
Temperatura	21°C	Cloruro	67
Presión	2.5 Mpa (25 bar)	Calcio	3
		Magnesio	4
		Calcio	3
		Magnesio	4
		Fósforo	6
		Citrato	0
		Lactato	<3
		Cenizas	25
		Total MS	3
		NNP	27
		Lactosa	<0.03

Un aspecto crítico de la nanofiltración en el procesado del lactosuero es que las pérdidas de lactosa se han de mantener en un mínimo (<0.1%) para evitar problemas de DBO (demanda biológica de oxígeno) en las aguas residuales (permeato). La instalación del equipo de NF en el procesado de suero se puede considerar en las siguientes situaciones:

- Como una alternativa de bajo coste para disminuir el sabor salado del suero dulce normal en polvo;
- Como un paso preliminar para conseguir una desmineralización más completa del suero por electrodiálisis e intercambio iónico;
- Para eliminación de ácido en suero de caseína de ácido láctico y clorhídrico; es de destacar que el ratio de pemeación es bajo para los iones lactato, pero alto para las moléculas de ácido láctico libres;
- Para reducción de sal en suero salado (por ejemplo, por goteos de sal en la fabricación de queso Cheddar).

Desmineralización de alto grado

Electrodiálisis

La electrodiálisis se define como el transporte de iones a través de membranas semipermeables no selectivas bajo la fuerza impulsora de una corriente continua (CC) y un potencial aplicado. La membrana utilizada tiene funciones de intercambio tanto aniónico como catiónico, haciendo que el proceso de electrodiálisis sea capaz de reducir el contenido mineral de un líquido de proceso, por ejemplo agua del mar o suero.

La Figura 15.9 constituye un diagrama esquemático de una unidad de electrodiálisis. Consiste en una serie de compartimentos separados alternativamente por membranas de intercambio de tipo aniónico y catiónico que están espaciadas del orden de 1 mm o menos. Los extremos de los compartimentos contienen electrodos. Se pueden tener unos 200 pares de células entre cada par de electrodos.

Los dos electrodos de cada extremo del paquete de células tienen canales separados de lavado, tal como se muestra en la Figura 15.9, a través de los cuales se circula separadamente una corriente acidificada para proteger los electrodos del ataque químico.

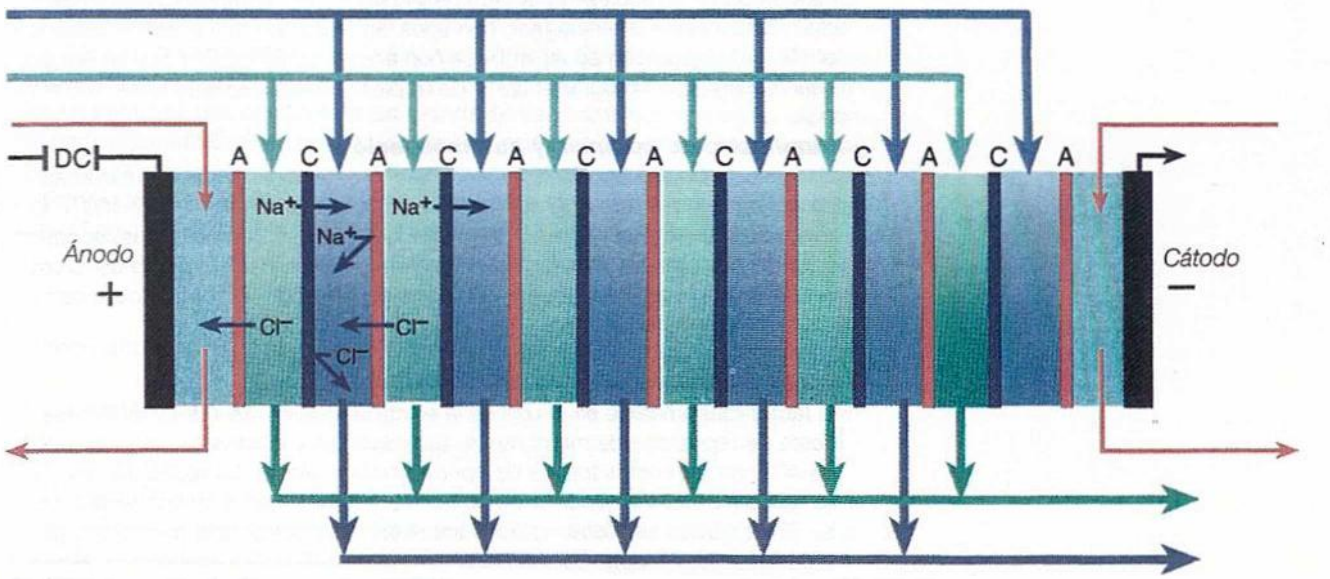


Fig. 15.9 *Paquetes de células de electrodiálisis.*

A = Aniones = cargados positivamente
C = Cationes = cargados negativamente
CC= Corriente continua

Lactosuero
Solución salina (salmuera)
Solución de enjuagado del electrodo

En el tratamiento del suero, el suero que entra y la salmuera acidificada pasan a través de células alternadas del paquete, cuya construcción puede ser de manera similar a un intercambiador de calor de placas o un módulo de ultrafiltración de placas.

Principio de operación

Las células alternadas del paquete de electrodiálisis actúan como células de concentración y dilución respectivamente. El suero se hace circular a través de las

células de dilución, y una solución al 5% de salmuera de arrastre a través de las células de concentración.

Cuando se aplica la corriente continua a través de las células, los cationes intentan migrar hacia el cátodo y los aniones hacia el ánodo, tal como se muestra en la Figura 15.9. Sin embargo, no es posible la migración completamente libre debido a que las membranas actúan como barreras frente a los iones de la misma carga. Los aniones pueden pasar a través de una membrana aniónica, pero son detenidos por una membrana catiónica. Del mismo modo, los cationes pueden pasar a través de una membrana catiónica pero no por una membrana aniónica. El resultado neto es la eliminación de iones en las células de suero (dilución). De esta manera el suero se desmineraliza, hasta una extensión determinada por el contenido en cenizas del suero, el tiempo de residencia en el paquete, la intensidad de corriente y la viscosidad al flujo.

La planta de electrodiálisis puede funcionar de manera continua o por cargas. Un sistema discontinuo, que se utiliza a menudo para ratios de desmineralización superiores al 70%, puede consistir en un paquete de membranas sobre el que el líquido de proceso, por ejemplo suero, circula hasta que se alcanza un cierto nivel de retención de sales minerales. Este nivel viene indicado por la conductividad del líquido en proceso. El tiempo de mantenimiento en un sistema discontinuo puede ser tan largo como 5-6 horas para una desmineralización del 90% a 30-40°C. La preconcentración del suero hasta un 20-30% de MS es deseable para mejorar la capacidad de utilización y el consumo de potencia eléctrica. El concentrado de suero se debe clarificar antes de que entre en la unidad de electrodiálisis.

La elevada temperatura de proceso implica que haya un riesgo de crecimiento bacteriológico en el producto. Por esto se añade al suero un compuesto bacteriostático, como peróxido de hidrógeno, cuando esto está permitido. El líquido se calienta durante el proceso, por lo que se necesita una etapa de enfriamiento para mantener la temperatura de proceso. En una planta continua, consistente en cinco paquetes de membranas en serie, el tiempo de mantenimiento se puede reducir hasta 10-40 minutos. El máximo ratio de desmineralización en estas plantas normalmente está limitado al 60-70%. En cuanto a la capacidad, la superficie de membrana instalada es mucho mayor en una planta continua que en una planta discontinua.

Una planta de electrodiálisis se puede automatizar fácilmente y se suele suministrar con un sistema programado de limpieza CIP. La secuencia de limpieza normalmente incluye un enjuagado con agua, limpieza con una solución alcalina (máx. pH 9), enjuagado con agua, limpieza con ácido clorhídrico (pH 1) y un enjuagado final con agua. Un programa típico de limpieza puede necesitar unos 100 minutos.

Suministro de potencia y automatización

En la planta de electrodiálisis se utiliza la corriente continua, cuya intensidad se debe poder regular en el rango 0-185 A, y un voltaje en el rango de 0-400 V. Durante la producción se monitorizan y controlan los caudales, temperaturas, conductividad, pH del agua de proceso y del producto, la presión de entrada del producto, la diferencia de presiones entre los paquetes, así como el voltaje sobre cada paquete de membranas.

Factores limitantes en la electrodiálisis

El factor más limitante en el uso de la electrodiálisis en las industrias lácteas es el coste de reposición de membranas, espaciadores y electrodos, que constituyen el 35-40% de los costes totales de operación de la planta. La reposición es necesaria debido al mal funcionamiento de las membranas, que a su vez se debe a:

- Precipitación de fosfato cálcico sobre las superficies de la membrana de intercambio catiónico.
- Depósitos de proteinas en las superficies de las membranas de intercambio aniónico.

El primer problema se puede solventar con el adecuado diseño de flujo sobre la superficie de la membrana y una limpieza ácida regular.

Los depósitos de proteinas son el factor principal en el acortamiento de la vida útil de las membranas aniónicas. La base de este problema es la siguiente: a un pH normal del suero, las seroproteinas se pueden considerar como iones muy negativos (aniones) y se mueven como tales bajo la influencia del campo eléctrico en el paquete de membranas. Estas moléculas, como son demasiado grandes para pasar a través de las membranas de intercambio aniónico, se depositan como una fina capa de proteinas sobre las caras de las membranas de intercambio aniónico

La electrodiálisis es el mejor procedimiento para niveles de desmineralización inferiores al 70%, rango en el que es muy competitiva con el intercambio iónico.

en los compartimentos de suero. Se pueden utilizar técnicas tales como inversión de polaridad para desalojar de la membrana estos materiales depositados.

Aunque una limpieza frecuente a elevado pH elimina la mayoría de los depósitos, se recomienda desmontar los paquetes de membranas para su limpieza manual a intervalos de 2-4 semanas.

Los costes de proceso de la electrodiálisis dependen mucho del ratio de desmineralización. Aumentando la capacidad en pasos desde el 50% al 75% y al 90% se doblan los costes de proceso en cada paso. Esto quiere decir que es cuatro veces más caro, por kilogramo de sólidos de producto, desmineralizar hasta el 90% que al 50%; la razón es que la capacidad de la planta se reduce cuando se desmineraliza al 90%.

El tratamiento del agua, la potencia eléctrica, los productos químicos y el vapor cuentan entre los costes de operación de una planta de desmineralización. El tratamiento de las aguas residuales es una partida particularmente fuerte. Durante la producción se producen fugas de lactosa a través de las membranas en una proporción del 7-10% en la desmineralización al 90%. El fosfato eliminado del suero también se acumula en la corriente de aguas residuales. El coste de la potencia eléctrica supone un 10-15% de los costes de operación, mientras que los productos químicos utilizados en el proceso, sobre todo ácido clorhídrico, suponen menos del 5%. El coste del vapor usado en el pretratamiento del producto y los costes de enfriamiento para el control de la temperatura de proceso son del orden del 10-15%, dependiendo del nivel de desmineralización.

La electrodiálisis es mejor para los niveles de desmineralización inferiores al 70%, donde resulta muy competitiva en comparción con el intercambio iónico.

Intercambio iónico

En contraste con la electrodiálisis, que es un proceso que elimina los sólidos ionizables de las soluciones sobre una base continua electroquímica, el proceso de intercambio iónico emplea bolitas de resina para absorber los minerales de la solución, intercambiándose por otras especies iónicas. Las resinas tienen una capacidad finita para realizar este trabajo, de manera que cuando están completamente saturadas, los minerales absorbidos deben ser eliminados y las resinas regeneradas antes de su reutilización. Normalmente las resinas se utilizan en columnas fijas con un diseño adecuado.

Las resinas de intercambio iónico son materiales plásticos porosos macromoleculares, que se presentan en forma de bolitas con diámetros que oscilan entre 0.3 y 1.2 mm para las distintas aplicaciones técnicas. Químicamente actúan como ácidos o bases insolubles que cuando se convierten en sales permanecen insolubles. La característica principal de las resinas de intercambio iónico es su capacidad para intercambiar los iones móviles que contienen por iones con el mismo signo de carga, contenidos en la solución a ser tratada. A continuación se muestra un ejemplo simple de esta reacción para la eliminación del cloruro sódico, donde R es el grupo de intercambio ligado a la resina insoluble.

Intercambio de cationes $R - H + Na^+ = R - Na + H^+$ resina en forma H^+

Intercambio de aniones $R - OH + Cl^- = R - Cl + OH^-$ resina en forma de OH^-

La reacción anterior se ha escrito deliberadamente como un equilibrio, ya que la dirección en la que ocurre la reacción depende de la concentración de iones en el líquido y en la fase sólida de la resina. El equilibrio se caracteriza por una constante. Durante la regeneración la reacción se invierte cuando la resina de intercambio iónico cargada con sodio se trata, por ejemplo, con una solución al 4% de ácido clorhídrico. La alta concentración de iones hidrógeno provoca el desplazamiento del equilibrio hacia la izquierda.

La constante de equilibrio varía dependiendo de las especies iónicas, que confiere selectividad a los procesos de intercambio iónico. En general, los iones multivalentes tienen una selectividad más alta que los monovalentes y los iones de la misma valencia son seleccionados por tamaño, de forma que los iones más grandes tienen una selectividad mayor. Para los cationes que normalmente se encuentran en las corrientes de los procesos lácteos, la selectividad decrece en el orden

$Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^{+} > Na^{+}$.

De forma similar, la selectividad del intercambio iónico se puede clasificar de la siguiente manera: citrato $^{-3} > HPO_4^{-2} > NO^{-3} > Cl^{-}$.

En la práctica esto quiere decir que el intercambiador iónico, después de haber sido agotado por un líquido que contenga diferentes especies iónicas, existirá en diferentes formas a lo largo de la longitud de la columna como se describe en la Figura 15.10. Esta figura muestra lo que sucede en una columna tratando un agua ordinaria en un intercambiador catiónico cargado en la forma de iones hidrógeno. También se muestra la situación tras la regeneración con ácido. Se puede ver que los cationes que permanecen más tiempo en la columna de intercambio catiónico son los iones Na. Esto podría explicarse por el grado de selectividad descrito anteriormente.

Volviendo al esquema de la columna agotada de intercambio catiónico que se muestra en la figura, la distribución estratificada de iones significa que los iones Na salen primero, seguidos por los iones Mg y Ca. Se puede producir un primer goteo de iones en la fase de agotamiento cuando el intercambiador de iones no está totalmente regenerado, pero después de un momento los iones Na son eluidos y reemplazados por iones H (ver la Figura 15.10). El estado de la parte más baja del intercambiador de iones determina la salida de iones del líquido de proceso.

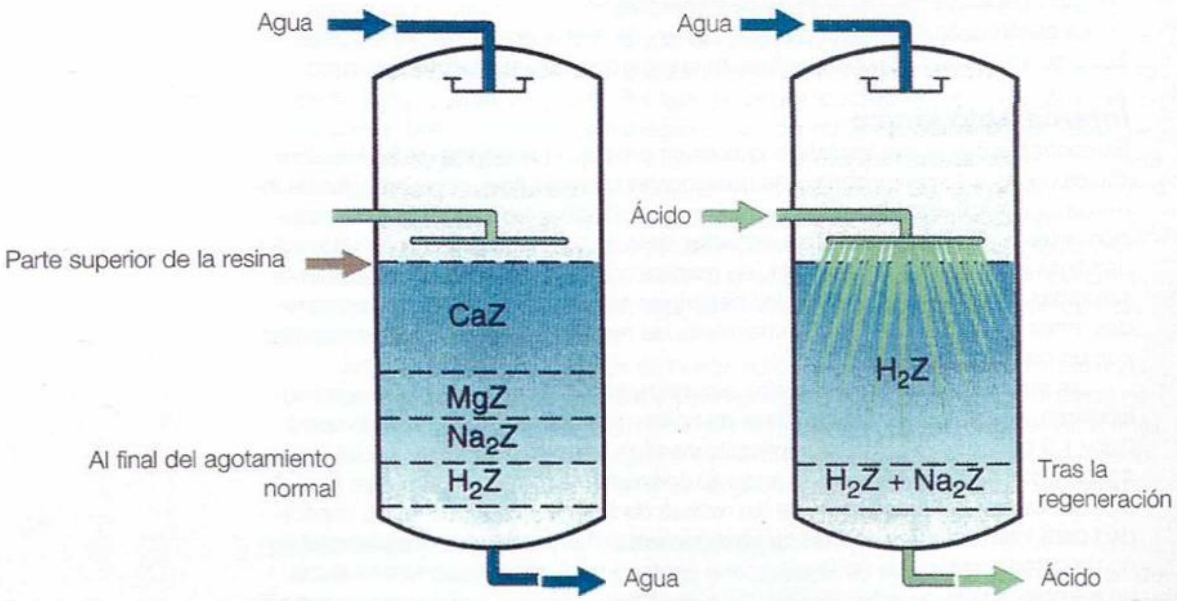


Fig. 15.10 *Lecho de resina del intercambiador catiónico antes y después de la regeneración con ácido.*

Características de la resina de intercambio iónico

Las resinas de intercambio iónico de uso industrial actuales se basan en materiales plásticos poliméricos para construir la estructura matriz porosa. Los materiales comunes son poliestireno/divinil benceno y poliacrilato. Los grupos funcionales están ligados químicamente a la estructura matriz. Los grupos son normalmente:

- Grupos sulfónicos $-SO_3^{-}H^{+}$ (intercambiador catiónico ácido fuerte)
- Grupos carboxilo $-COO^{-}H^{+}$ (intercambiador catiónico ácido débil)
- Aminas cuaternarias $\backslash N^{+}\ OH^{-}$ (intercambiador aniónico básico fuerte)
- Aminas terciarias $-NH^{+}\ OH^{-}$ (intercambiador aniónico básico débil)

Ambos intercambiadores ácidos o básicos fuertes están totalmente ionizados en todo el intervalo de pH, 0-14. Los intercambiadores iónicos ácidos o básicos

débiles tienen un intervalo restringido de pH en el que son activos. Los intercambiadores catiónicos ácidos débiles no se pueden utilizar normalmente en el rango de pH bajo, 0-7, debido a que los grupos carboxilo se presentan principalmente en su forma de ácido libre tal como viene determinado por su constante de disociación ácido/base (a menudo expresada como pK_a = -logaritmo en base 10 de la constante de disociación). A valores de pH mayores que pK_a los grupos carboxílicos están en su forma de sal, y pueden por lo tanto participar en las reacciones de intercambio iónico. En contraste, las resinas de intercambio aniónico básicas débiles son sólo activas en el rango bajo de pH, 0-7.

Desde el punto de vista de facilidad de regeneración es más interesante utilizar resinas débiles cuando sea posible. Se pueden regenerar con ácido/base respectivamente con un exceso de sólo un 10-50% de las cantidades necesarias teóricas. Las resinas fuertes requieren un exceso de ácido/base del 300-400% respecto de las cantidades teóricas necesarias en regeneración. Para la desmineralización, de acuerdo con el proceso clásico, se combina un intercambiador catiónico ácido fuerte regenerado en forma de hidrógeno con un intercambiador aniónico básico débil trabajando en forma de base libre (hidroxilo). No es posible utilizar un intercambiador catiónico ácido débil en lugar de uno fuerte, debido a que el equilibrio es mucho más ventajoso para el intercambio de cationes por el hidrógeno ligado que para los grupos hidroxílicos.

Otras características importantes de los intercambiadores iónicos, que no se van a discutir son:

- Capacidad de intercambio iónico
- Propiedades de hinchamiento
- Resistencia mecánica
- Fluidización durante el reflujo del lecho
- Pérdidas de carga
- Restricciones de velocidad de flujo
- Necesidades de enjuagado con agua tras la regeneración

Procesos de intercambio iónico para desmineralización

La desmineralización por intercambio iónico ha sido durante mucho tiempo un proceso establecido para el tratamiento del agua, pero se ha adoptado también durante las dos últimas década para la "desmineralización" del lactosuero. El lactosuero no es un producto uniforme en cuanto a su composición. El suero procedente de una cuajada de caseina/queso ácida tiene un pH de 4.3-4.6, mientras que el pH de un suero dulce es de 6.3-6.6. La diferencia principal entre estos dos tipos de suero, aparte del medio acidificante, es el alto nivel de fosfato cálcico en el suero ácido. Es una buena práctica utilizar los cationes como base para calcular la carga de sal en el suero, debido a que los aniones, por ejemplo los citratos y fosfatos, están implicados en reacciones proteolíticas. Esto complica el cálculo de los contenidos de iones específicos. Las cifras de contenidos de cationes son típicas para los sueros ácidos y dulces, tal como se muestra en la Tabla 15.6.

Tabla 15.6
Contenido de cationes del lactosuero dulce y ácido.

Ion	Lactosuero dulce		Lactosuero ácido	
	%	meq/l	%	meq/l
Na	0.050	22.0	0.050	22.0
K	0.160	41.0	0.160	41.0
Ca	0.035	17.5	0.012	10.0
Mg	0.007	5.8	0.012	10.0
Total		86.3		133.0

Por lo tanto, el suero se puede caracterizar como un líquido con una carga elevada de sal que, como consecuencia, da lugar a ciclos cortos cuando se aplica un intercambio iónico. Esto, a su vez, da lugar a unos costes elevados de productos químicos de regeneración, si no se recuperan .

Intercambio iónico convencional para desmineralización

En la Figura 15.11 se muestra una planta simple de desmineralización que utiliza el intercambio iónico. El suero entra primero en el intercambiador catiónico fuerte,

cargado en forma H, y continua hacia el intercambio aniónico en un intercambiador catiónico fuerte en su forma básica libre. Las columnas de intercambio iónico se enjuagan y se regeneran de forma separada con ácido clorhídrico diluido e hidróxido sódico (amoníaco). Una vez al día las columnas se desinfectan con una pequeña cantidad de solución de cloro activo.

Las siguientes reacciones netas tienen lugar durante la desmineralización (el ClNa se utiliza para ilustrar las sales del suero y R representa un punto de intercambio de la resina insoluble).

Intercambio catiónico: $R - H + Na^+ + Cl^- \longrightarrow R - Na + H^+ + Cl^-$

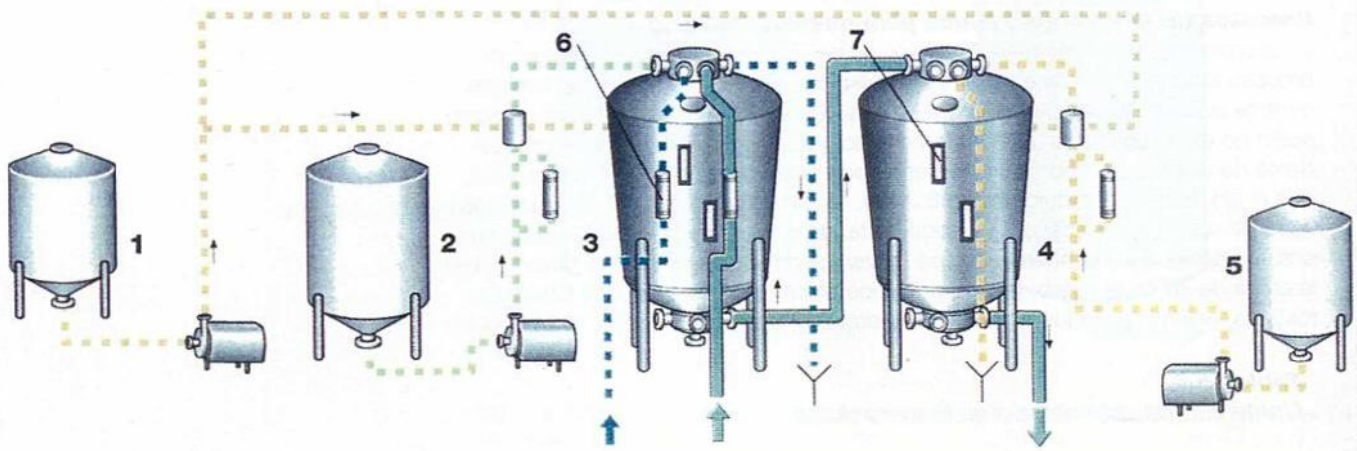
Intercambio aniónico: $R - OH + H^+ + Cl^- \longrightarrow R - Cl + H_2O$

Los distintos flujos que tienen lugar en el proceso de intercambio iónico incluyen los siguientes pasos:

- Agotamiento
  10 - 15 volúmenes de lecho de suero se pueden tratar por regeneración. El volumen de lecho se basa en el volumen de lecho del intercambiador catiónico.
- Regeneración
- Desplazamiento del lactosuero
- Reflujo
- Contacto con la solución de regeneración
- Enjuagado con agua

Las columnas de intercambio iónico se construyen a menudo de acero dulce recubierto con caucho para evitar los problemas de corrosión. La forma cónica se utiliza especialmente para el intercambiador aniónico para permitir el hinchamiento del lecho durante la transición de la forma base libre a la forma de sal.

Se utiliza frecuentemente el flujo a contracorriente para la regeneración del intercambiador catiónico. De esta manera cuando el suero se trata según un flujo



Lactosuero
HCl
Agua de red
NaOH
Desinfectante

Las líneas de trazos se utilizan en las fases regenerativa y de desinfección.

1. *Tanque de desinfección*
2. *Tanque de HCl*
3. *Tanque catiónico*
4. *Tanque aniónico*
5. *Tanque de NaOH*
6. *Caudalímetro*
7. *Visor*

Fig. 15.11 *Planta de desmineralización de lactosuero de queso mediante intercambio iónico clásico.*

descendente, la regeneración tiene lugar según un flujo ascendente. Este sistema reduce un 30-40% el consumo de productos químicos de regeneración, pero a expensas de un diseño más complicado. La planta se puede automatizar facilmente. Para conseguir un flujo continuo de suero es necesario instalar dos o tres sistemas de intercambio iónico en paralelo. El tiempo normal de ciclo es de seis horas, cuatro de las cuales se utilizan en regeneración.

Limitaciones del proceso

El suero es un líquido con una elevada carga de sal, lo que implica tiempos cortos de trabajo entre regeneraciones. También implica un consumo elevado de productos químicos de regeneración y una elevada carga salina en las aguas residuales procedentes tanto de la desmineralización como del exceso necesario de agentes químicos. El consumo de agua de enjuagado es también alto, especialmente en el lavado del exceso de hidróxido de sodio de las resinas aniónicas débiles.

En estas columnas tienen lugar pérdidas de seroproteinas debido a la desnaturalización/absorción. Esto es causado por la gran variación de pH que tiene lugar en el suero durante el proceso de intercambio iónico. El consumo de productos

químicos de regeneración supone el 60-70% de los costes de operación del proceso.

El proceso se diseña inicialmente para conseguir un 90% de desmineralización, pero se puede seleccionar cualquier ratio de desmineralización si se utiliza un sistema by-pass.

Un proceso de intercambio iónico alternativo

Con el fin de reducir el consumo de agentes químicos de regeneración, y conseguir una situación más aceptable en las aguas residuales de la planta de desmineralización, el Departamento de I+D de la Swedish Dairies Association, SMR, ha desarrollado un proceso alternativo de intercambio iónico. En este proceso, cuyas operaciones unitarias se muestran en la Figura 15.12, el suero entra primero a la columna aniónica que contiene una resina básica débil regenerada en la forma de bicarbonato (HCO_3^-). Durante el intercambio aniónico los aniones del suero se intercambian por iones HCO_3^-. Después de esto, el suero entra en la columna catiónica, que contiene una resina de intercambio catiónico débil regenerada en la forma de amonio (NH_4^+). Durante el paso del suero a través de la columna los cationes del suero se intercambian por iones NH_4. Por esto, tras el proceso, las sales del suero se intercambian por bicarbonato amónico (NH_4HCO_3). Las reacciones se pueden resumir en las siguientes fórmulas, donde el ClNa se utiliza para representar las sales del suero y R representa los puntos de intercambio de la resina insoluble.

Intercambio aniónico: $R - HCO_3 + Na^+ + Cl^- \longrightarrow R - Na^+ + HCO_3^-$

Intercambio catiónico: $R - NH_4 + Na^+ + HCO_3^- \longrightarrow R - Na + NH_4^+ + HCO_3^-$

El NH_4HCO_3 es una sal termolítica que se descompone en NH_3, CO_2 y H_2O cuando se calienta. A continuación se volatiliza en la siguiente evaporación del lactosuero, ofreciendo la posibilidad de recuperar el NH_3 y el CO_2 que se separan del lactosuero para obtener una nueva solución de regeneración (NH_4HCO_3). Parte de la solución gastada de regeneración que contiene un exceso de NH_4HCO_3 se recupera mediante una torre de destilación (se utiliza alrededor del 100% del exceso de NH_4HCO_3).

La Figura 15.13 muestra la disposición de un proceso SMR a gran escala. El suero se envía primero a una columna de intercambio aniónico en forma de HCO_3 y a continuación se envía a una columna de intercambio catiónico en forma de NH_4. Los sistemas de intercambio iónico se disponen en pares, mientras que uno trabaja el otro está regenerando. El tiempo de ciclo es de cuatro horas.

Después de pasar la unidad de intercambio iónico (1), el lactosuero enfriado se utiliza para recuperación de calor en la columna de absorción y como medio de enfriamiento en el condensador (2) conectado a la torre de destilación (9). A continuación, el suero entra al evaporador (3) y finalmente el suero desmineralizado concentrado se seca por atomización (10). El condensado de la etapa 2 del evaporador, que es especialmente rico en amoníaco, se separa de la otra corriente de condensado y continua hacia la torre de adsorción (4) donde forma la base líquida para la nueva solución de regeneración. Los condensados de las etapas 1 y 2 del evaporador se utilizan para la limpieza de las resinas de intercambio iónico. El amoniaco es de esta manera recuperado en gran medida. La mayor parte del dióxido de carbono separado durante la evaporación se recupera en forma gaseosa en los gases de salida de la bomba mecánica de vacío del evaporador. Este gas fluye directamente por el fondo de la columna de absorción, donde es completamente absorbido junto con otras corrientes de entrada en la forma de NH_4HCO_3. La recuperación no es total, por lo que la torre de absorción va provista de bocas de inyección de solución nueva de NH_3 25% y CO_2.

La parte de la solución de regeneración que es rica en NH_4HCO_3 se recoge en un tanque (8), donde se precipita el fosfato mediante la adición de $MgCl_2$ tras un ligero ajuste de pH con NaOH. Cuando se deposita el precipitado de fosfato amónico magnésico ($MgNH_4PO_4$), el líquido sobrenadante se bombea hasta la parte superior de la torre de destilación (9) y al mismo tiempo se precalienta en un intercambiador de calor de placas (que no se muestra) utilizando el líquido del fondo como medio de calentamiento. Alrededor del 10% del líquido se separa como vapor, que a su vez se condensa mediante el lactosuero tratado en intercambio iónico.

El proceso SMR tiene las siguientes características:

- Bajos costes de operación debido a la recuperación de los productos químicos de regeneración.

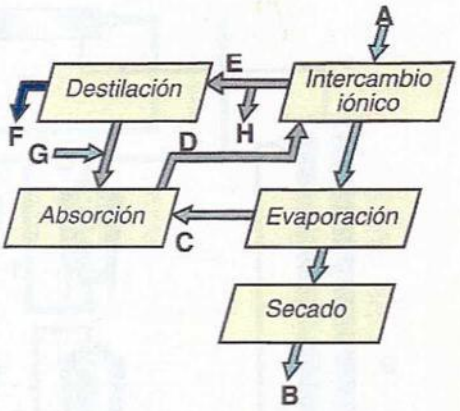
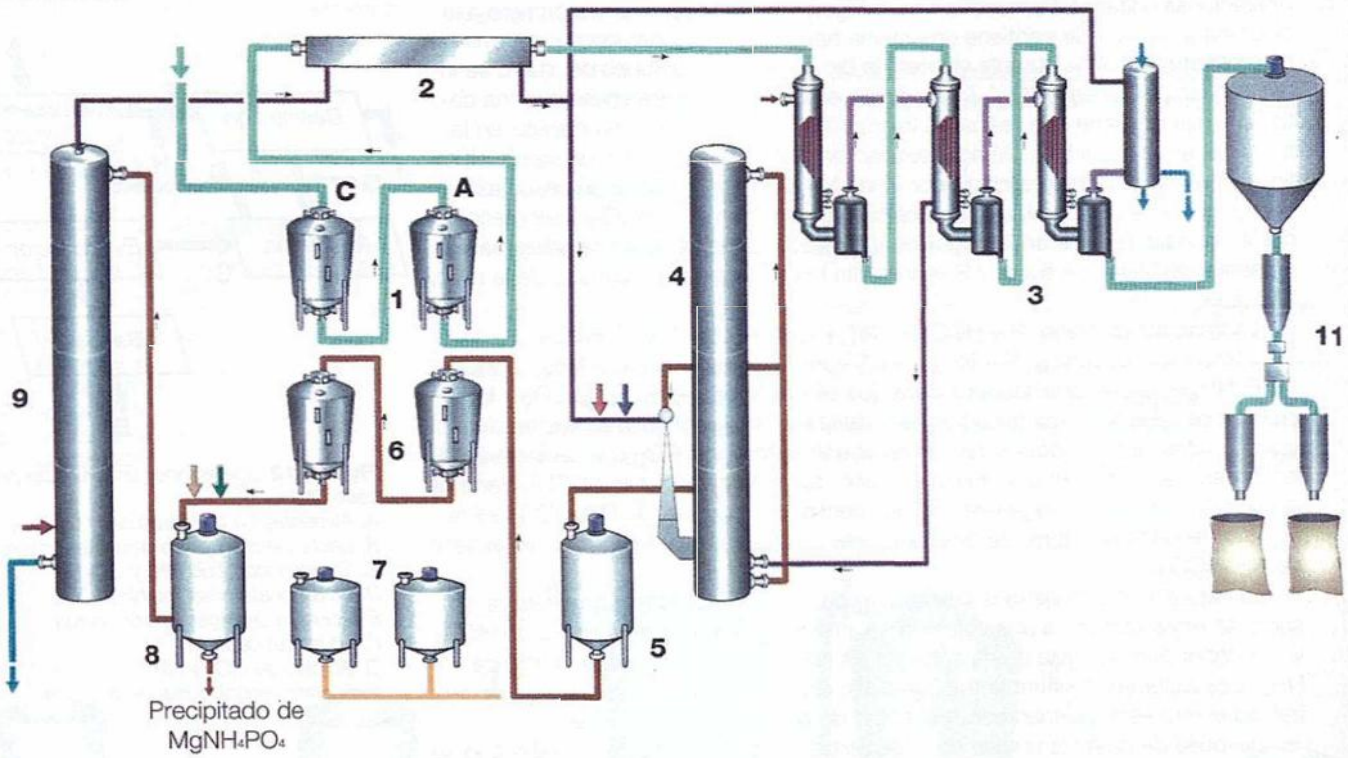


Fig. 15.12 *Operaciones unitarias del proceso SMR.*
A. Alimentación de lactosuero
B. Lactosuero en polvo desmineralizado
C. Condensado con NH_3 y CO_2
D. Bicarbonato amónico NH_4HCO_3
E. Solución de regeneración usada
F. Aguas residuales
G. Adición de CO_2 + NH_3
H. Fosfato amónico magnésico

1. *Intercambiadores iónicos de tratamiento del lactosuero*
2. *Condensador*
3. *Evaporador*
4. *Torre de absorción*
5. *Tanque para solución nueva de regeneración*
6. *Intercambiadores iónicos en regeneración*
7. *Tanques para NH_3 y HCl*
8. *Tanque para solución usada de regeneración*
9. *Torre de destilación*
10. *Atomizador*
11. *Ensacado*

- Bajas pérdidas de sólidos de lactosuero y sólo la mitad de descarga de sal comparado con el proceso clásico de intercambio iónico.
- Pequeñas variaciones de pH durante el intercambio iónico (6.5-8.2), lo que da lugar a un daño mínimo de las proteinas de lactosuero.
- Alta eficacia en la desmineralización, superior al 90%.
- Baja temperatura de operación (5-6°C), mejorando el estado bacteriológico del producto final.
- Elevado rendimiento en sólidos de lactosuero en comparación con el intercambio iónico clásico y la electrodiálisis.
- Optima recuperación de calor.



Lactosuero/lactosuero desmineralizado en polvo
Vapor
Refrigerante y condensado
Vapor de producto
Vapor + CO_2 + NH_3
CO_2
NH_3
Solución de regeneración nueva y usada
$MgCl_2$
NaOH
Solución de regeneración en torre

Fig. 15.13 *Diagrama de flujo de una planta de gran capacidad de producción para desmineralización de lactosuero en polvo.*
A Intercambiador aniónico C Intercambiador catiónico

Limitaciones del proceso y costes

En la mayoría de los casos, dependiendo de los costes de los productos químicos utilizados, los costes de operación del proceso SMR son un 30-70% más bajos que los del proceso clásico de intercambio iónico. Como todos los sistemas de desmineralización, la electrodiálisis y el tradicional intercambio iónico, el proceso es sensible a los altos contenidos de Ca en la corriente de alimentación, por lo que se aconseja utilizar el ajuste de pH y el calentamiento como etapas de pretratamiento antes de la desmineralización. Con esta técnica se puede precipitar fácilmente el 80% del fosfato cálcico del lactosuero ácido, para ser refinado y utilizado en alimentación animal o incluso para consumo humano.

El equipamiento de proceso incluye más componentes que el proceso clásico de intercambio iónico. Los costes de inversión inicial son más altos, pero éstos se han de analizar considerando las ventajas de los bajos costes de operación y la mejora del medioambiente que rodea la planta de proceso.

Conversión de la lactosa

Hidrólisis de la lactosa

La lactosa es un disacárido, compuesto por los monosacáridos glucosa y galactosa (véase la Figura 15.14). La lactosa tiene dos isómeros que son la α-lactosa y la β-lactosa. Difieren en la disposición espacial del grupo hidroxilo en el átomo de carbono de la molécula de glucosa, y difieren también, entre otras cosas, en:

- Solubilidad
- Forma de los cristales
- Punto de fusión
- Efectos fisiológicos

El desdoblamiento de la lactosa se puede realizar hidrolíticamente, mediante la incorporación de agua, o enzimáticamente. La enzima que desdobla la lactosa, llamada β-galactosidasa, pertenece al grupo de las hidrolasas. La Figura 15.14 muestra el desdoblamiento enzimático de la lactosa en galactosa y glucosa.

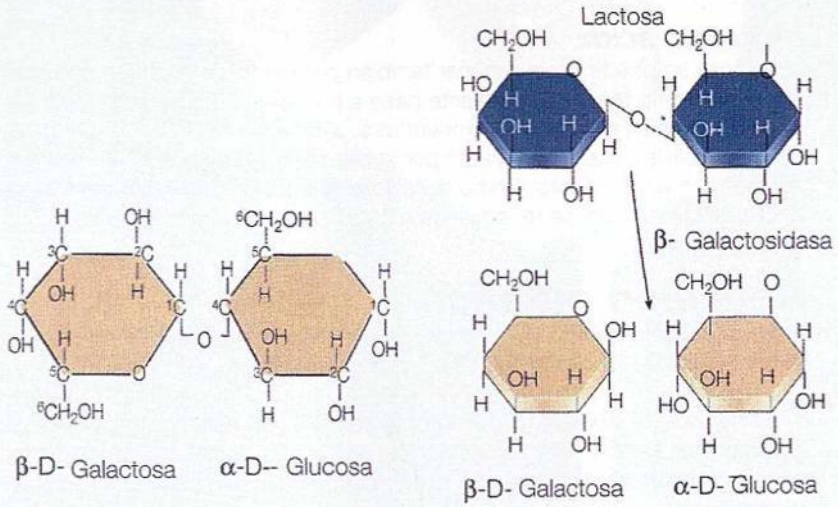


Fig. 15.14 *Estructura química de la lactosa y desdoblamiento de la lactosa.*

La lactosa no es tan dulce como otros tipos de azúcares. Esto se muestra en la Figura 15.15, que indica el grado relativo de dulzor de diferentes tipos de azúcares. Por ello, la hidrólisis de la lactosa da lugar a productos considerablemente más dulces.

Alguna gente carece de la enzima que descompone la lactosa y son, por lo tanto, incapaces de beber o comer cantidades significativas de productos lácteos. A esto se le llama intolerancia a la lactosa. Sin embargo, si se procede a la hidrólisis de la lactosa en los productos lácteos, esta gente puede tomarlos, utilizando así proteinas de alta calidad, vitaminas, etc., presentes en estos productos. Algunos defectos, tales como una estructura arenosa en los helados de crema (cristalización de la lactosa), se eliminan prácticamente por medio de la hidrólisis de la lactosa de la leche.

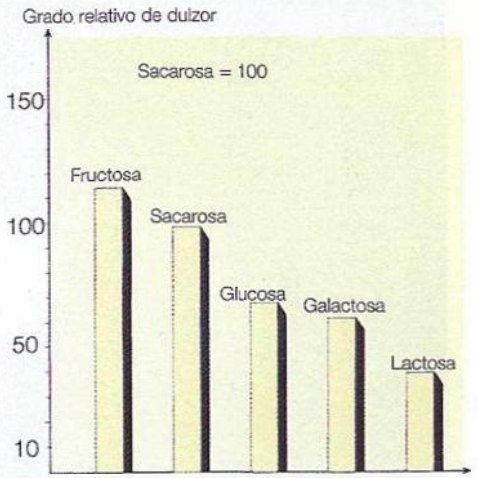


Fig. 15.15 *Grado de dulzor de diferentes tipos de azúcares.*

Hidrólisis enzimática

La Figura 15.16 muestra un proceso para efectuar la hidrólisis enzimática de la lactosa del suero de la leche.

Para realizar este proceso no es necesario un tratamiento previo de desmineralización, pero si se hace se mejora el gusto del producto final. Después de su hidrólisis, el suero se evapora. De esta forma se obtiene un jarabe con un contenido en sólidos del 70-75%. El 85% de la lactosa presente en este jarabe se haya en forma hidrolizada, por lo que puede ser utilizada como edulcorante en panadería, confitería y en la elaboración de helados.

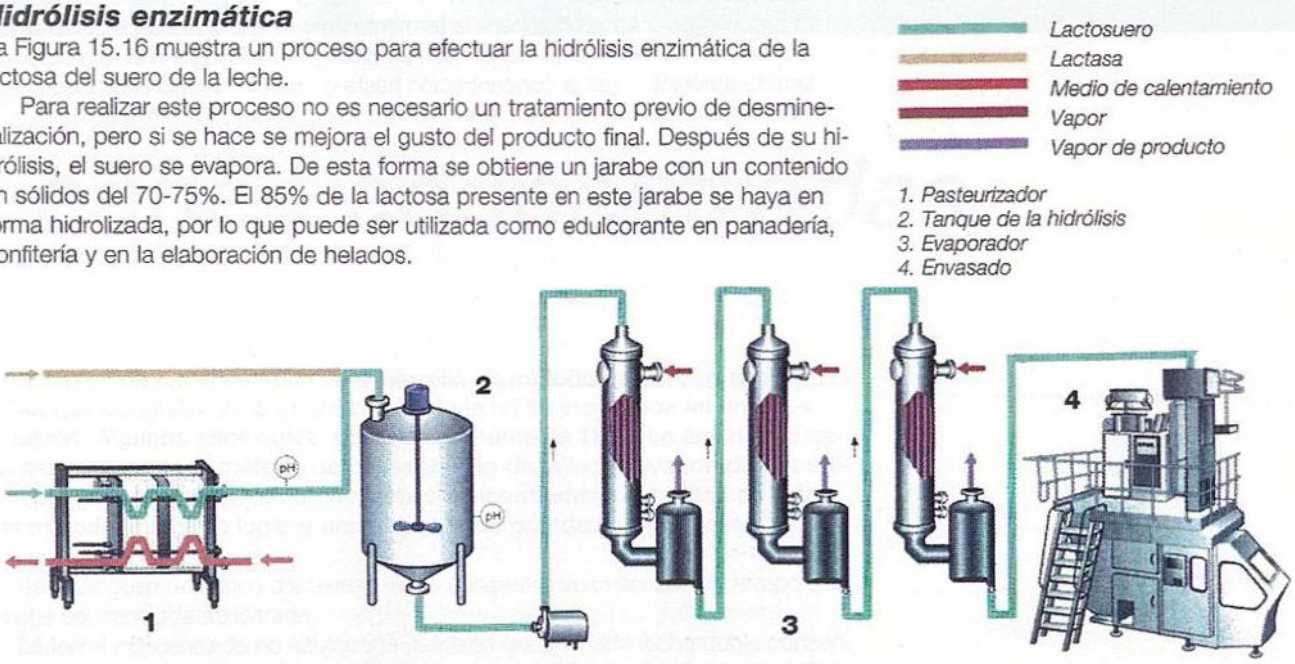


Fig. 15.16 *Planta de hidrólisis enzimática de la lactosa de lactosuero.*

Durante el proceso de producción, la enzima se inactiva por tratamiento térmico o por ajuste de pH. No puede utilizarse nuevamente. En vez de utilizar enzimas libres, en la actualidad es posible fijar la enzima en diferentes tipos de soportes solubles o no solubles en agua. Este tipo de sistemas con enzimas inmovilizadas pueden ser utilizados en la hidrólisis continua de la lactosa. La enzima, que es cara, no es consumida y puede utilizarse para la hidrólisis de grandes cantidades de producto. De esta forma se aumenta la rentabilidad del proceso. Esta técnica no se ha desarrollado todavía en gran extensión.

Hidrólisis ácida

La lactosa se puede descomponer también por medio de ácido en combinación con tratamiento térmico o mediante paso a través de un intercambiador catiónico en forma de hidrógeno a alta temperatutra, alrededor de 100°C. El grado requerido de hidrólisis viene determinado por la selección del pH, de la temperatura y el tiempo de mantenimiento. Como durante esta hidrólisis del suero tiene lugar una decoloración marrón, se recomienda el tratamiento con carbón activo.

Reacción química

Se ha establecido que los productos nitrogenados no protéicos se pueden utilizar como reemplazantes parciales de las proteinas naturales en rumiantes ya que ciertos microbios que habitan en el rumen del ganado pueden sintetizar proteinas a partir de urea y amoniaco. Sin embargo, con el fin de conseguir un pienso equilibrado en nitrógeno y energía, la urea y el amoniaco han de ser transformados a formas más adecuadas, que lentamente desprenden nitrógeno al rumen para la síntesis mejorada de proteinas.

La lactosil urea y el lactato amónico son dos de estos productos con base en el lactosuero.

Lactosil urea

Brevemente, el proceso para la producción es como sigue: tras la separación el suero se concentra hasta el 75% de MS, normalmente en dos etapas. Tras la adición de urea y de ácido sulfúrico de uso en procesos alimentarios el suero concentrado se mantiene a 70°C durante 20 horas en un tanque encamisado provisto con agitador. Bajo estas condiciones la urea reacciona con la lactosa para formar lactosil urea.

Después del periodo de reacción el producto se enfría y se transporta hasta una fábrica de piensos concentrados (pelets por ejemplo) o se lleva directamente a los granjeros.

Lactato amónico

El proceso de obtención implica la fermentación de la lactosa del suero a ácido láctico y el mantenimiento del pH con amoniaco, dando lugar a la formación de lactato amónico. Tras la concentración hasta un 61.5% de MS el producto está listo para utilizar.

Capítulo 16

Leches concentradas

A principios de los años 1880 se desarrolló un método de conservación de la leche, que consistía en la esterilización de la leche evaporada en envases estancos. Algunos años antes, aproximadamente en 1850, un americano había perfeccionado el método de conservación de la leche evaporada por adición de azúcar. La fabricación de leches concentradas basándose en estos dos métodos ha dado lugar a una industria de grandes proporciones.

Se distinguen dos tipos diferentes: leche concentrada no azucarada (evaporada) y leche concentrada azucarada.

La leche concentrada no azucarada (también denominada leche doble concentrada) es un producto esterilizado, de color claro y con la apariencia de nata. Este producto tiene un amplio mercado, como, por ejemplo, en paises tropicales, en el

mar y para alimento de las fuerzas armadas. Se utiliza en los lugares donde no se dispone de leche fresca. La leche evaporada no azucarada se utiliza también como un sustituto de la leche materna. En este caso se añade vitamina D. Se utiliza también para cocinar, como crema para el café, etc. Este producto se hace a partir de leche entera, leche desnatada o leche recombinada con leche desnatada en polvo, grasa láctea anhidra (GLA) y agua como ingredientes típicos (ver también el capítulo 18, Productos de leche recombinada).

Notas sobre la leche concentrada

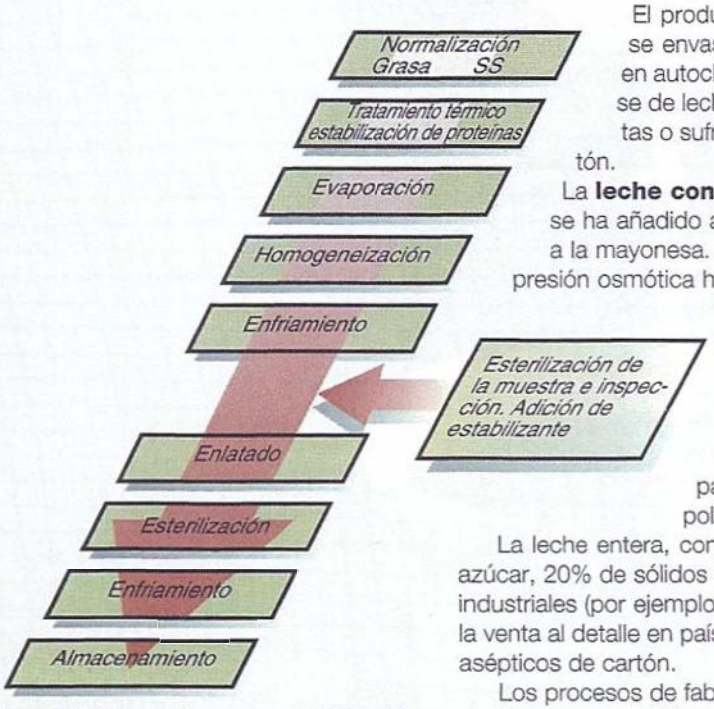


Fig. 16.1 *Pasos del proceso de fabricación de leche concentrada no azucarada.*

El producto evaporado, la **leche concentrada no azucarada**, se envasa normalmente en latas que se esterilizan a continuación en autoclaves o esterilizadores horizontales. Los concentrados a base de leche recombinada pueden ser enlatados y esterilizados en latas o sufrir un tratamiento UHT y ser envasados en paquetes de cartón.

La **leche condensada** es básicamente una leche concentrada a la cual se ha añadido azúcar. El producto es ligeramente amarillento y se parece a la mayonesa. La alta concentración de azúcar en esta leche aumenta la presión osmótica hasta tal punto que la mayoría de los microorganismos son destruidos. La concentración de azúcar en la fase acuosa no debe ser inferior al 62.5%, ni superior al 64.5%. En este último caso, la solución azucarada alcanza su punto de saturación y comienza la cristalización, formándose un sedimento. Este producto se puede hacer a partir de leche entera o de leche desnatada, o a partir de leche recombinada a base de leche desnatada en polvo, grasa láctea anhidra (GLA) y agua.

La leche entera, condensada y azucarada, contiene un 8% de grasa, 45% de azúcar, 20% de sólidos no grasos y 27% de agua. Se llena en tambores para usos industriales (por ejemplo, en la fabricación de helados y chocolates) y en latas para la venta al detalle en países de climas tropicales, y últimamente también en envases asépticos de cartón.

Los procesos de fabricación para ambos productos aparecen en los diagramas de bloques en las Figuras 16.l y 16.2. La primera etapa, en ambos casos, incluye una normalización precisa del contenido graso y del contenido en sólidos. Después se procede a un tratamiento térmico que sirve en parte para destruir los microorganismos de la leche y en parte para estabilizar la leche, de forma que se evite el riesgo de coagulación en el proceso de esterilización que sigue. Los requisitos en cuanto a la materia prima y a los tratamientos iniciales son idénticos para ambos tipos de producto. Después el proceso difiere ligeramente.

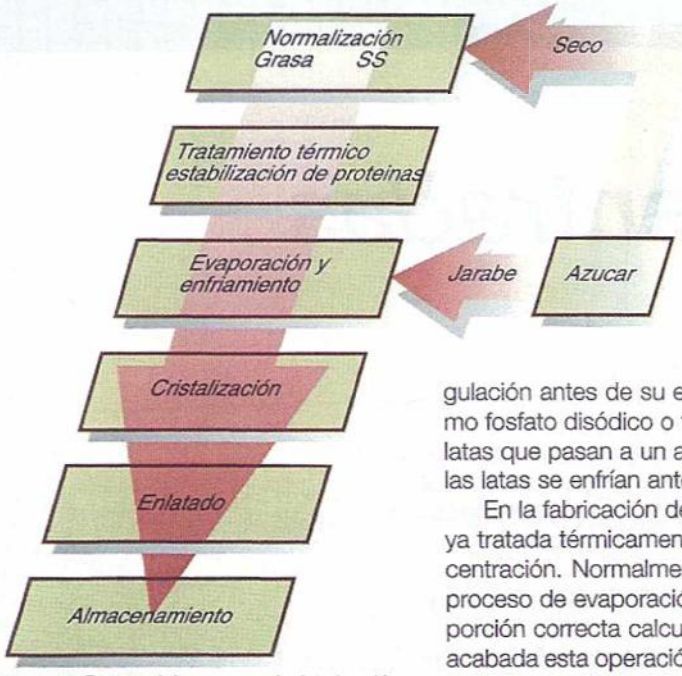


Fig. 16.2 *Pasos del proceso de fabricación de leche condensada azucarada.*

En la fabricación de **leche evaporada no azucarada**, la leche ya tratada térmicamente se bombea a un evaporador donde se procede a su concentración. La leche se homogeneiza antes de su enfriamiento. Se hacen comprobaciones frecuentes de la estabilidad de la leche a la coagulación antes de su envasado, y si es necesario se añade algún estabilizante, como fosfato disódico o trisódico. El llenado del producto se hace, a continuación, en latas que pasan a un autoclave para su esterilización. Una vez acabado el proceso, las latas se enfrían antes de almacenarlas.

En la fabricación de **leche condensada** (leche evaporada azucarada), la leche ya tratada térmicamente se bombea a un evaporador donde se procede a su concentración. Normalmente, se añade azúcar en solución al concentrado durante el proceso de evaporación, pero también se puede añadir azúcar en polvo, en la proporción correcta calculada sobre sustancia seca, antes de la evaporación. Una vez acabada esta operación de concentración, el producto se enfría de forma que la lactosa forme cristales muy pequeños en una solución sobresaturada. Estos cristales deben ser tan pequeños, de menos de 10 μm, que no puedan ser detectados por

el paladar. Después de su enfriamiento y cristalización, la leche condensada azucarada es enlatada y almacenada.

Materia prima para la elaboración de leches concentradas

La calidad de la materia prima utilizada en la elaboración de leches concentradas debe ser básicamente la misma que la utilizada en la fabricación de los demás productos lácteos. Además, se tienen dos consideraciones importantes a la hora de fabricar leche evaporada:

- El número de esporas y bacterias resistentes al calor presentes en la leche
- La capacidad de la leche de tolerar un tratamiento térmico fuerte sin coagular (estabilidad de las proteínas).

Calidad bacteriológica de la materia prima

La evaporación se lleva a cabo bajo vacío a una temperatura que no debe superar los 65-70°C. A temperaturas por debajo de 65°C las esporas y bacterias resistentes al calor se encontrarán con unas condiciones ideales para su desarrollo, lo que puede dar lugar a que se estropee el proceso completo. Por lo tanto, una condición esencial en la fabricación de leche concentrada es el control preciso de las bacterias presentes en el proceso.

Estabilidad térmica de la materia prima

La capacidad de la leche para resistir tratamientos térmicos fuertes depende en gran medida de su acidez, que debe ser baja, así como del equilibrio salino de la leche. Este último está sujeto a variaciones estacionales, según el tipo de alimentación y la fase de lactación. Es posible mejorar la capacidad de la leche para soportar el nivel de tratamiento térmico requerido.

Tratamiento previo

Es esencial llevar a cabo un tratamiento previo tanto en la leche concentrada no azucarada como en la azucarada, en el que se incluye la normalización del contenido graso, así como del contenido en sólidos no grasos y un tratamiento térmico.

Normalización

Las leches concentradas se comercializan con un contenido previamente fijado de grasa y sólidos. Las cifras varían según el estándar aplicado, pero son normalmente un 8% de grasa y un 18% de sólidos no grasos. La proporción de grasa con respecto a los sólidos no grasos es, por lo tanto, de 8:18 ó 1:2.25. Los porcentajes estipulados son valores mínimos que deben ser mantenidos, pero por razones económicas, no deben ser sobrepasados más allá de un margen razonable. Los niveles de operación pueden ser fijados de forma acorde, por ejemplo, en un 8.05% de grasa y un 18.10% de sólidos no grasos.

Los modernos sistemas automáticos de normalización permiten que ésta se realice de forma continua y extremadamente precisa, tanto para el contenido en grasa como para la relación grasa/sólidos no grasos. En el capítulo 6.2 se da más información sobre la normalización: Separadoras centrífugas y normalización de la grasa de la leche.

Tratamiento térmico

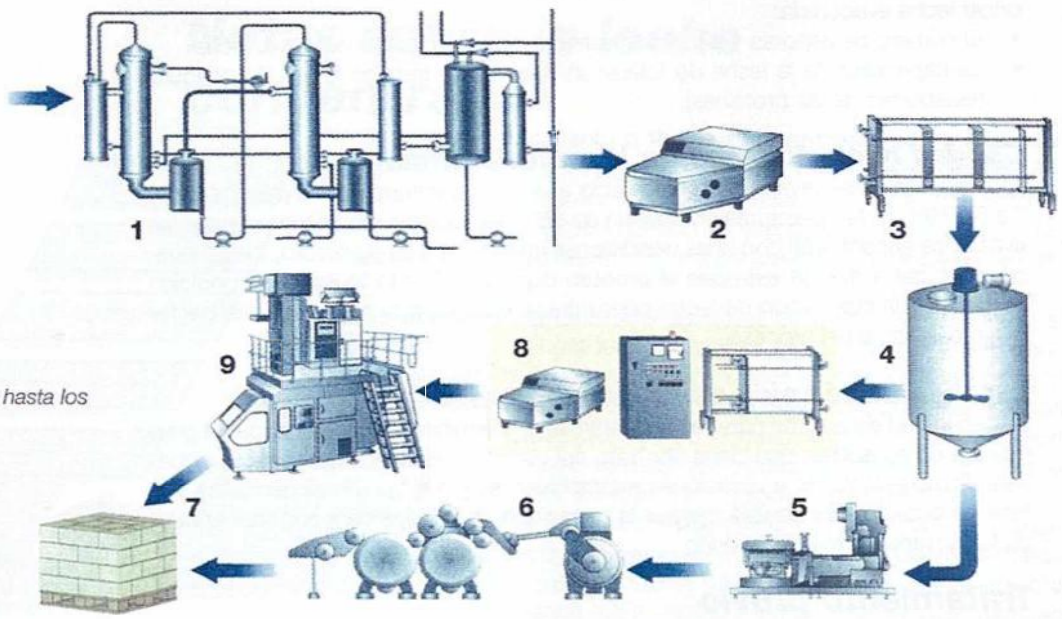
Antes de la esterilización, la leche normalizada debe sufrir un tratamiento térmico intenso con objeto de destruir los microorganismos presentes y mejorar la estabilidad a la coagulación de la leche. El tratamiento térmico citado, que normalmente se integra en la planta de evaporación, se realiza en un intercambiador de calor de carcasa y tubos o en uno de placas, a una temperatura de 100-120°C durante 1-3 minutos, seguido de un enfriamiento hasta unos 70°C antes de que la leche entre en el evaporador.

Durante el tratamiento térmico, una gran parte de las proteínas del suero son desnaturalizadas y, al mismo tiempo, se produce la precipitación de sales cálcicas. De esta forma el complejo proteínico de la leche se estabiliza, pudiendo soportar la siguiente esterilización sin que se produzcan coagulaciones durante el almacenamiento.

La naturaleza del tratamiento térmico determinará en gran medida la viscosidad del producto final y de aquí que sea extremadamente importante para la calidad del producto.

Leche evaporada no azucarada

La Figura 16.3 muestra las diferentes etapas en la fabricación de leche evaporada no azucarada. La materia prima es leche fresca.



1. *Evaporación*
2. *Homogeneización*
3. *Enfriamiento*
4. *Tanque intermedio*
5. *Enlatado*
6. *Esterilización*
7. *Almacenamiento*

Procesado alternativo hasta los puntos 5 y 6.

8. *Tratamiento UHT*
9. *Envasado aséptico*

Fig. 16.3 *Línea de fabricación de leche concentrada no azucarada.*

Evaporación

El evaporador suele ser del tipo de película descendente y múltiple efecto. La leche pasa a través de tubos calentados por vapor y sometidos a vacío. Se produce su ebullición a temperaturas comprendidas entre 65 y 70ºC. El contenido de materia seca de la leche aumenta conforme se evapora el agua. Se efectúa una comprobación constante de la densidad. La concentración en sólidos se considera correcta cuando la densidad ha alcanzado un valor de aproximadamente 1.07. En ese momento, se habrá producido 1 kg de leche evaporada no azucarada con 8% de grasa y 18% de sólidos no grasos a partir de 2.1 kg de leche cruda, con un contenido graso de 3.8% y un contenido en sólidos no grasos de 8.55%..

Homogeneización

La leche concentrada se bombea desde el evaporador a un homogeneizador, que trabaja a una presión de 12.5-25 MPa (125-250 bar). De esta forma se consigue la dispersión de la grasa y se evita que los glóbulos de grasa formen grumos durante el proceso posterior de esterilización. Normalmente se recomienda una homogeneización en dos etapas.

La homogeneización no debe ser demasiado intensa, ya que puede perjudicar la estabilidad de las proteínas, con el consiguiente riesgo de coagulación de la leche durante su esterilización. Se trata por lo tanto de encontrar la presión exacta de homogeneización que sea lo suficientemente alta como para dar la requerida dispersión de la grasa, pero lo suficientemente baja como para evitar el riesgo de coagulación.

Enfriamiento y esterilización de una muestra

Después de su homogeneización, la leche se enfría a unos 14ºC si se va a envasar directamente o a unos 5-8ºC si se va a mantener almacenada mientras se realiza una prueba de esterilización. En esta etapa del proceso se realiza una comprobación final del contenido en grasa y de sólidos no grasos.

Como se indicó anteriormente, la estabilidad al calor de la leche concentrada puede mejorarse por la adición de un estabilizante, que suele ser el fosfato disódico

o trisódico. La cantidad de fosfato a añadir se determina en la prueba de esterilización.

Cualquier adición de vitaminas se realiza también en esta etapa.

Enlatado

Las máquinas de enlatado de leche concentrada llenan y cierran automáticamente las latas antes de su esterilización. La temperatura de llenado se selecciona adecuadamente con objeto de que la formación de espuma sea la menor posible.

Esterilización

Las latas una vez llenas y cerradas pasan de las máquinas llenadoras/cerradoras al autoclave, que puede funcionar de forma continua o por cargas. En el autoclave discontinuo las latas primero se apilan en jaulas especiales, que se disponen a continuación en el autoclave. En los autoclaves de funcionamiento continuo las latas pasan a través del autoclave sobre una cinta transportadora a una velocidad controlada de forma precisa (ver también las figuras del Capítulo 9: Leche de larga duración.

En ambos tipos las latas se mantienen en movimiento durante la esterilización. De esta forma, el calor se distribuye de forma más rápida y uniforme a través de las latas. Cualquier precipitación proteínica durante este tratamiento térmico se distribuye uniformemente en toda la leche que contiene la lata. Después de un cierto período de calentamiento la leche alcanza la temperatura de esterilización de 110-120°C. Esta temperatura se mantiene durante 15-20 minutos, procediéndose después al enfriamiento de la leche hasta la temperatura de almacenamiento.

El tratamiento térmico descrito es intenso. Ello da lugar a una ligera coloración marrón debido a las reacciones químicas que tienen lugar entre las proteinas y la lactosa (reacciones de Maillard o reacción de pardeamiento).

Tratamiento UHT

Las plantas de tratamiento UHT (descritas en el capítulo 9: Leche de larga duración) pueden emplearse también para la esterilización de la leche concentrada. En este caso, después de efectuar la prueba de esterilización y de adicionar si es necesario alguna sustancia estabilizante, la leche se bombea hasta la planta UHT, donde se calienta a 140°C durante unos 3 segundos. Después de su enfriamiento, la leche se llena en envases asépticos y se almacena.

Almacenamiento e inspección

Las latas y/o los paquetes de cartón envasados asépticamente de leche concentrada son etiquetadas antes de ser colocadas en cajas de cartón. La leche concentrada puede almacenarse durante largos períodos de tiempo a una temperatura de 0-15°C. Si la temperatura de almacenamiento es demasiado alta, la leche adquiere un color ligeramente marrón, y se producen precipitaciones proteínicas si la temperatura de almacenamiento es demasiado baja.

La leche concentrada debe tener un color claro y una apariencia de nata. Se deben tomar varias latas de muestra de cada lote de producción para su inspección. Estas latas son incubadas a tres temperaturas diferentes: temperatura ambiente, 30 y 38°C. Después, se examinan a los 10-14 días con objeto de determinar la calidad del lote. Se procede entonces a la comprobación de su contenido en grasa, sólidos no grasos, viscosidad, y recuento de bacterias y esporas, así como a la determinacion de su sabor, color y olor. Cierto número de latas son mantenidas hasta un año por si se presenta alguna reclamación y hay que proceder a análisis similares a los citados.

Leche condensada (leche evaporada azucarada)

La Figura 16.4 muestra una línea de proceso para la fabricación de leche condensada a partir de leche fresca. Antes de la evaporación se procede a la normalización del contenido en grasa y sólidos no grasos de la leche, hasta los valores previamente fijados, de la misma forma que se ha visto para la leche evaporada. También se procede a un tratamiento térmico de dicha leche, con objeto de destruir microorganismos y enzimas que podrían provocar problemas así como para estabilizar su complejo proteínico. Además, el tratamiento térmico es importante para desarrollar la viscosidad del producto durante su almacenamiento, lo cual es particularmente relevante en el caso de la leche condensada azucarada. Si el tratamiento térmico es

Etapas en la fabricación de leche condensada *azucarada:*

- Adición de azúcar y evaporación
- Enfriamiento hasta unos 30°C
- Siembra y posterior enfriamiento hasta 15-18°C (cristalización)
- Enlatado (o envasado) e inspección

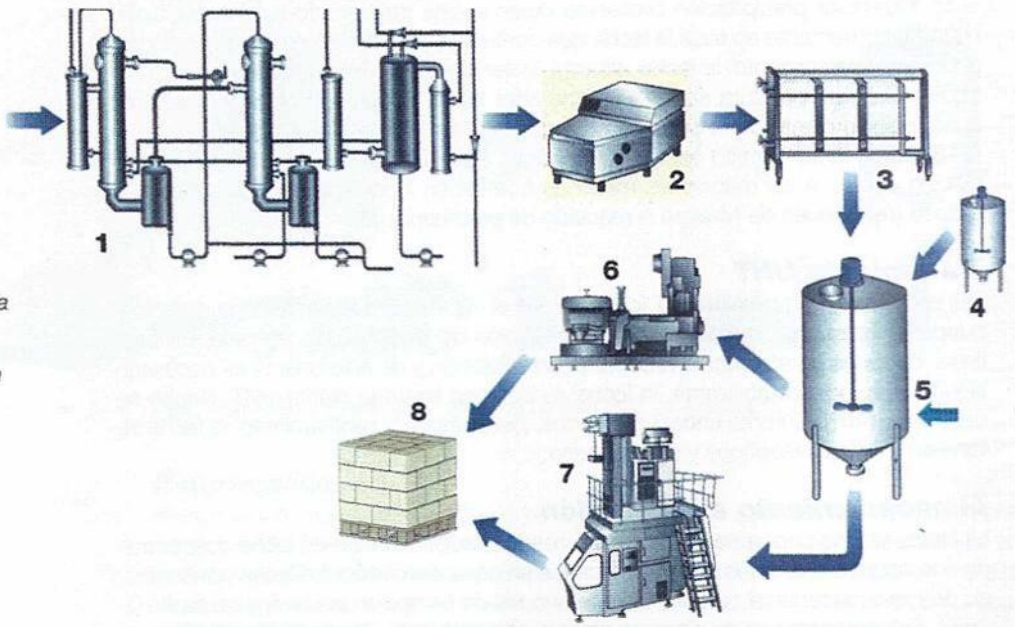
muy severo se puede provocar una estructura de tipo gel en el producto. La leche se calienta normalmente a 82°C durante 10 minutos si se quiere obtener un producto con una viscosidad relativamente alta. Si se trata de un producto de baja viscosidad, la combinación temperatura/tiempo debe ser de 116°C/30 segundos.

En la fabricación de leche condensada es necesaria la adición de azúcar, lo que constituye un paso clave. Es importante que se añada la proporción correcta, ya que la vida comercial de la leche depende de que la presión osmótica sea lo suficientemente alta. Es necesario un contenido en azúcar de al menos un 62.5% en la fase acuosa con objeto de producir una presión osmótica lo bastante alta como para inhibir el desarrollo de bacterias.

Se emplean dos métodos para la adición del azúcar.

- Adición de azúcar sólida antes del tratamiento térmico.
- Adición de un jarabe azucarado en el evaporador.

La etapa en la que se realiza la adición de azúcar afecta a la viscosidad del producto final. Según mantiene una teoría, la adición temprana de azúcar puede provocar una viscosidad demasiado elevada en el producto durante su almacenamiento.



1. *Evaporación*
2. *Homogeneización, si se hace*
3. *Enfriamiento*
4. *Adición de lactosa concentrada*
5. *Tanque de cristalización*
6. *Enlatado*
7. *Envasado alternativo en cartón*
8. *Almacenamiento*

Fig. 16.4 *Línea de fabricación de leche condensada azucarada.*

Evaporación

La evaporación de la leche condensada se realiza esencialmente de la misma forma que la de la leche concentrada no azucarada. Cuando la adición del azúcar se realiza en el evaporador, el jarabe entra y se mezcla con la leche a la mitad del proceso. Continúa entonces la evaporación hasta alcanzar el contenido en sólidos requerido. Dicho contenido en sólidos se comprueba indirectamente mediante la determinación de la densidad del concentrado. Cuando se ha alcanzado el valor requerido de materia seca o de contenido en sólidos, el valor de la densidad debe ser aproximadamente de 1.30 para leche entera condensada y 1.35 para leche desnatada condensada. En esta etapa, se habrá obtenido 1 kg de leche condensada con 8% de grasa, 45% de azúcar y 27% de agua, a partir de 2.5 kg de leche entera del 3.2%, mezclada con 0.44 kg de azúcar.

Algunos fabricantes homogeneizan el concentrado a 5-7.5 Mpa (50-75 bar) inmediatamente después de la evaporación como una forma de regular la viscosidad del producto final.

Enfriamiento y cristalización

La leche condensada debe enfriarse después de la evaporación. Esta es la etapa más crítica e importante de todo el proceso. El agua presente en la leche condensada sólo puede mantener en solución la mitad de la cantidad de lactosa. Por lo tanto, la otra mitad precipitará en forma de cristales. Si se permite que el exceso de lactosa precipite libremente, los cristales de azúcar serán grandes y el producto será arenoso e inadecuado para muchas aplicaciones. Es por ello preferible controlar la

cristalización de la lactosa de forma que se obtengan cristales muy pequeños. En la leche de primera calidad, los cristales más grandes permitidos tienen un tamaño máximo de 10 μm. Estos cristales permanecerán dispersos en la leche a las temperaturas normales de almacenamiento, 15-25ºC, y no se notan en el paladar.

La cristalización requerida se realiza por enfriamiento rápido de la mezcla bajo agitación vigorosa, evitando la entrada de aire. Para provocar dicha cristalización se siembran cristales de lactosa finamente molidos en la leche, en una proporción del 0.05% de la mezcla total (como polvo o en solución), cuando ésta se ha enfriado a la temperatura de cristalización (unos 30ºC). La mezcla se enfría tan rápidamente como sea posible hasta 15-18ºC, después de una agitación vigorosa y continua durante aproximadamente 1 hora.

La viscosidad de la leche condensada es alta, por lo que se necesitan agitadores muy robustos en los depósitos de cristalización.

La leche condensada fría se bombea hasta un depósito de almacenamiento donde se mantiene hasta el día siguiente con objeto de completar el proceso de cristalización.

Envasado e inspección

La leche condensada debe ser de color amarillento y tener la apariencia de mayonesa. Tradicionalmente se envasa en latas, que en este caso deben ser previamente lavadas y esterilizadas antes del llenado, ya que no se procederá a la esterilización posterior.

Actualmente también es posible envasar asépticamente la leche condensada azucarada en paquetes de cartón.

El producto se envasa también en bidones con una capacidad de unos 300 kg para abastecer a usuarios a gran escala.

Los fabricantes de leche condensada deben guardar algunas de estas latas o paquetes de cartón como muestra, y comprobar el estado del producto durante el año siguiente a su producción. Se debe comprobar el tamaño de los cristales, además de analizar los parámetros ya indicados para la leche concentrada.

Capítulo 17

Leche en polvo

Desde hace siglos se conoce el método de conservación de los alimentos por secado de los mismos, con lo que se elimina el agua que necesitan los microorganismos para su desarrollo. De acuerdo con las descripciones que Marco Polo hizo de sus viajes a Asia, los habitantes de Mongolia producían leche en polvo por secado al sol.

En la actualidad, la leche en polvo se produce a gran escala en modernas plantas de proceso. La leche en polvo desnatada tiene un período máximo de conservación de unos 3 años. La leche en polvo entera tiene un periodo máximo de conservación de unos 6 meses. Ello es debido a que la grasa presente en el polvo se oxida durante el almacenamiento, con el consiguiente deterioro gradual del sabor.

El proceso de secado

Por secado se entiende el proceso por el que el agua presente en un producto líquido (leche en este caso) es eliminada, de forma que el producto adquiere un estado sólido. El contenido en agua de la leche en polvo oscila entre el 2.5 y el 5%, por lo que no puede haber un crecimiento bacteriano con un contenido de humedad tan bajo. El secado aumenta el período de conservación de la leche, reduciendo simultáneamente su peso y volumen. Ello hace que también se reduzca el coste de su transporte y almacenamiento.

La *liofilización* ha sido utilizada para elaborar productos en polvo de alta calidad. En este proceso, el agua es evaporada de la leche bajo la acción del vacío. Este método ofrece grandes ventajas desde el punto de vista de la calidad, ya que la fracción proteínica no se ve afectada. El polvo se verá siempre afectado en mayor o menor extensión si el secado se hace a temperaturas elevadas. El secado por liofilización, sin embargo, no se ha utilizado ampliamente, debido en parte al alto consumo energético que conlleva.

Los *métodos comerciales* de secado se basan en suministrar calor al producto. El agua se evapora y se elimina como vapor. El residuo que queda es el producto seco (la leche en polvo). Dos son los métodos que principalmente se utilizan para el secado en la industria láctea: el secado por *atomización* y el secado en *cilindros rotatorios*. En el secado por atomización, la leche primero se concentra por evaporación y posteriormente se seca en una torre de atomización.

Durante la primera etapa del secado se evapora el exceso de agua que está en forma libre entre las partículas de los sólidos. En la etapa final también se evapora el agua contenida en poros y capilares de las partículas sólidas.

La primera etapa es relativamente rápida, mientras que la última necesita más tiempo y energía. El producto se verá afectado de forma significativa por el calor si este secado se realiza de modo que las partículas de leche entren en contacto directo con las superficies calientes de transferencia térmica (como es el caso del secado en rodillos). El polvo puede contener partículas quemadas que perjudican su calidad.

Distintos usos de productos en polvo

La leche en polvo se utiliza para muchas aplicaciones, tales como:

- recombinación de leche;
- mezcla con la masa en la industria panadera, con objeto de aumentar el volumen del pan y mejorar su capacidad de absorción de agua. De esta forma, el pan permanecerá fresco por un período de tiempo mayor.
- mezcla con la masa utilizada en pastelería, para que los productos resulten más crujientes
- para sustitución de los huevos en el pan y la elaboración de pasteles
- en la producción de chocolate con leche, en la industria chocolatera
- en la producción de salchillas y varios tipos de comidas preparadas en la industria alimentaria y en alimentación de colectividades
- en la producción de alimentos infantiles, como sustituto de la leche materna
- en la producción de helados
- en la fabricación de piensos para el ganado

Tabla 17.1

Leche desnatada en polvo de calidad extra.

(especificaciones ADMI para leche desnatada en polvo)*

Propiedad	Atomizada no excederá de	Secada en rodillos no excederá de
Contenido de grasa láctea	1.25%	1.25%
Contenido de humedad	4.00%	4.00%
Acidez titulable, ác. láctico	0.15%	0.15%
Índice de solubilidad	1.25 ml**	15.00 ml
Contenido bacteriano	50 000 per gram	50 000 per gram
Partículas quemadas	Disco B (15.0 mg)	Disc C (22.5 mg)

* ADMI = American Dry Milk Institute Inc. (Esta institución también ha publicado los "Standards For Grades of Dry Milks" que incluyen los Métodos de Análisis).

** Excepto polvos designados como de "alto tratamiento térmico" (high-heat, HH), para los que el máximo permitido es de 2.0 ml.

Leche desnatada en polvo

La leche desnatada en polvo es con mucho el tipo de leche en polvo más común.

Cada uno de los campos de aplicación tiene sus requerimientos específicos en cuanto a las características de la leche en polvo. Si el polvo se va a mezclar con agua para producir leche reconstituida o recombinada, para consumo humano, dicho polvo debe ser fácilmente soluble y tener el sabor correcto y el valor nutritivo adecuado. Un cierto grado de caramelización de la lactosa es beneficioso en la producción de chocolate. En el primer ejemplo citado, el secado del producto en la torre de atomización debe ser lo más suave posible, mientras que en el segundo caso ocurre lo contrario, el polvo debe someterse a un intenso tratamiento térmico en secadores de rodillos. Por ello, se distinguen dos tipos de leche en polvo:

1. leche en polvo secada en rodillos
2. leche en polvo obtenida en torres de atomización

La Tabla 17.1 muestra un ejemplo de los estándares aplicables a la leche en polvo desnatada. La solubilidad del polvo obtenido por atomización es muy buena, mientras que la del producto en polvo obtenido mediante secado en rodillos es apreciablemente peor. Ello es debido al intenso tratamiento térmico que recibe la leche en los rodillos.

Dependiendo de la intensidad del tratamiento térmico, la leche en polvo se clasifica en diferentes categorías relacionadas con las distintas combinaciones temperatura/tiempo a las que la leche desnatada ha sido expuesta durante la evaporación y secado.

El tratamiento térmico desnaturaliza las seroproteinas, de forma que el porcentaje desnaturalizado se incrementa con la intensidad del tratamiento térmico. El grado de desnaturalización se expresa normalmente mediante el Indice de Nitrógeno Proteico en el Suero (INPS), como los miligramos de seroproteina no desnaturalizada (s.p.n.d.) por gramo de polvo.

En la Tabla 17.2 se resumen distintos aspectos sobre las categorías de la leche en polvo desnatada producida por atomización.

Tabla 17.2

Categorías de leche desnatada en polvo obtenida por atomización.

Categoría	Temp./tiempo	INPS** mg/g seroproteina no desnaturalizada
Tratamiento térmico extra bajo	<70°C	*
Polvo de bajo tratamiento	70°C/15s	>6.0
Polvo de medio tratamiento	85°C/20s	5 - 6.0
"	90°C/30s	4 - 5.0
"	95°C/30s	3 - 4.0
Tratamiento medio-alto	124°C/30s	1.5 - 2.0
Tratamiento alto	aprox. 135°C/30s	<1.4
Muy estable de tratamiento alto	aprox. 135°C/30s	<1.4

* No se puede medir.

**Índice de Nitrógeno de proteína de suero.

Tabla extraída de Sanderson N.Z., J. Dairy Technology, 2,35 (1967)

Leche entera en polvo

La leche entera en polvo secada por atomización normalmente se produce a partir de leche normalizada. Después de la normalización, la leche no necesita ser homogeneizada dado que es continuamente agitada, sin inclusión de aire, antes de la evaporación y después de nuevo entre la evaporación y la atomización. Sin embargo, el concentrado se homogeneiza en ciertos casos para la producción de leche entera instantánea.

La leche normalizada en grasa para la producción de leche en polvo secada en rodillos normalmente se homogeneiza.

La leche entera en polvo, a diferencia de la leche desnatada en polvo, no es clasificada en categorías. La leche para la elaboración de leche entera en polvo normalmente se pasteuriza a 80-85°C para inactivar la mayoría de las enzimas lipolíticas que, de otra manera, podrían degradar la grasa láctea durante el almacenamiento.

Leche en polvo instantánea

Durante los últimos años se han desarrollado métodos especiales para la producción de leche en polvo, tanto entera como desnatada, con una extremadamente buena solubilidad, a la que se le llama leche en polvo instantánea. Este polvo tiene unos granos de mayor tamaño que el polvo normal secado por atomización, y se disuelve de forma instantánea incluso en agua fria.

Densidad aparente

Cuando la leche en polvo se transporta a lo largo de grandes distancias es importante que tenga una elevada densidad aparente para reducir el volumen ocupado, ya que en la mayoría de los casos los costes de transporte se calculan por volumen. Una densidad aparente elevada también provoca ahorros en materiales de envasado y embalaje. Sin embargo, en algunos casos los fabricantes pueden estar interesados en conseguir densidades aparentes bajas para suministrar en apariencia mayores cantidades de polvo que la competencia. La densidad aparente baja, como viene influida por la aglomeración, es también una característica importante de la leche en polvo instantánea.

Definición

La densidad aparente es el peso de una unidad de volumen de polvo; en la práctica se expresa en g/ml, g/100 ml o g/l.

Factores que influyen sobre la densidad aparente

La densidad aparente de la leche en polvo es una propiedad muy compleja; es el resultado de otras propiedades y es influida por distintos factores. Los principales factores que determinan la densidad aparente son:

1. La densidad de partícula, dada por:
   - -la densidad del material pulverulento
   - -el contenido de aire ocluido dentro de las partículas
2. El contenido de aire intersticial, como el aire entre las partículas.

Densidad del material pulverulento

La densidad del material pulverulento viene determinada por la composición del polvo. Depende de los contenidos y de las densidades de los componentes individuales, y se puede calcular de acuerdo con la fórmula:

$$\frac{100}{\frac{\%A}{D_A} + \frac{\%B}{D_B} + \frac{\%C}{D_C} + \text{etc.} + \%\ \text{Humedad}}$$

Donde %A, %B, %C equivalen a los porcentajes de los componentes cuyas densidades son D_A, D_B, D_C.

Contenido de aire ocluido

La leche en polvo normalmente contiene entre 10 y 30 ml de aire atrapado por cada 100 g de polvo. Existen muchos factores que influyen en la presencia de aire ocluido en las partículas de polvo.

Algunos de estos factores se consideran a continuación:

- Incorporación de aire en el alimento. El concentrado está efectivamente desaireado por la evaporación, pero cuando se transfiere al atomizador puede tomar aire en las tuberías de transporte, etc.
- El sistema elegido de rociado/atomización del concentrado en el atomizador.
- Las propiedades del alimento. La cantidad de aire incorporado en el producto depende no sólo de la intensidad de la acción de batido realizado antes o durante la atomización, sino también de las propiedades del alimento (el producto entrante al atomizador), como la capacidad de formar espuma estable. Esta propiedad viene influida principalmente por el contenido y estado de las proteinas y la posible presencia de inhibidores de espuma. Por lo anterior el concentrado que contiene grasa es mucho menos propenso a la formación de espuma que la leche desnatada. Los siguientes factores influyen sobre las propiedades de formación de espuma de la leche desnatada en el proceso de secado:
- Las proteinas del suero no desnaturalizadas tienen una gran tendencia a formar espuma; esta tendencia se puede reducir mediante tratamiento térmico proporcional al grado de desnaturalización (ver la Tabla 17.2).

- Los concentrados con un bajo contenido de sólidos totales forman más espuma que los concentrados con mayores contenidos de sólidos.
- Los concentrados fríos forman espuma más facilmente que los calientes.

Aire intersticial

El contenido de aire entre las partículas, el aire intersticial, puede suponer alrededor de 127 ml/100 g de polvo. Esta es una propiedad muy compleja que depende por ejemplo de la distribución de tamaños de partícula y del grado de aglomeración.

Producción de leche en polvo

En la producción de leche en polvo con la utilizacion de *rodillos de secado*, la leche tratada previamente se aplica sobre los rodillos, de forma que todo el proceso de secado se realiza en una sola etapa, hasta alcanzar el contenido en sólidos requerido.

En la producción de leche en polvo utilizando el secado por atomización, primero se efectúa una concentración de la leche por evaporación a vacío, hasta un contenido en MS de aproximadamente 45-55 %. La leche desnatada en polvo obtenida por atomización se fabrica según dos calidades:

- producto ordinario, de calidad normal y
- producto aglomerado (leche en polvo instantánea) obtenido según distintos sistemas de atomización.

Después del secado en rodillos o por atomización, el polvo obtenido se envasa en latas, bolsas de papel, bolsas laminadas o bolsas de plástico, dependiendo de la calidad del producto y de las exigencias del consumidor.

Materia prima

En la fabricación de leche en polvo se exige una calidad muy estricta de la materia prima. La Tabla 17.1 muestra que el número de bacterias por gramo de polvo no debe ser superior a 50.000, o incluso 30.000 en algunos paises. Esto corresponde a unas 5.000 (ó 3.000) bacterias por litro de producto reconstituido, siempre que no se produzcan reinfecciones. Como el método de secado por atomización incluye una evaporación previa a vacío, es muy importante, como se indicaba en la producción de leche concentrada, mantener la flora bacteriana resistencia al calor bajo control, de forma que no se multiplique durante la evaporación. Por ello, se utiliza la *bactofugación* o la *microfiltración* en la producción de leche en polvo, con objeto de eliminar las esporas bacterianas presentes en la misma, mejorando de esa manera la calidad bacteriológica del producto final.

Se tiene una demanda muy estricta de calidad en la leche que será materia prima para la producción de leche en polvo.

La leche para la fabricación de leche en polvo no debe someterse a un tratamiento térmico intenso excesivo antes de entrar a la planta de obtención de leche en polvo. Un tratamiento térmico de este tipo provocaría la coagulación de las proteínas del suero, y la solubilidad, aroma y sabor de la leche en polvo se verían dañadas. La leche se somete a la prueba de la peroxidasa o a la prueba de las proteínas del suero, con objeto de determinar si el tratamiento térmico fue demasiado intenso. Ambas pruebas indican si la leche ha sido o no pasteurizada previamente a altas temperaturas.

Tratamientos previos generales de la leche

En la fabricación de leche desnatada en polvo, la leche es previamente clarificada y desnatada adecuadamente. Esto también se realiza en el caso de que se normalice el contenido en grasa en un sistema directo de normalización. La leche normalizada utilizada para la producción de *leche entera en polvo* normalmente no se homogeneiza a menos que se seque en rodillos.

La *leche desnatada* que se va a destinar a la producción de leche en polvo se debe pasteurizar al menos hasta que el test de la fosfatasa sea negativo. En la producción de *leche entera* en polvo, el tratamiento térmico debe ser lo suficientemente intenso como para inactivar las enzimas lipasas. Ello significa que hay que proceder a una pasteurización a alta temperatura hasta obtener una prueba negativa de la peroxidasa.

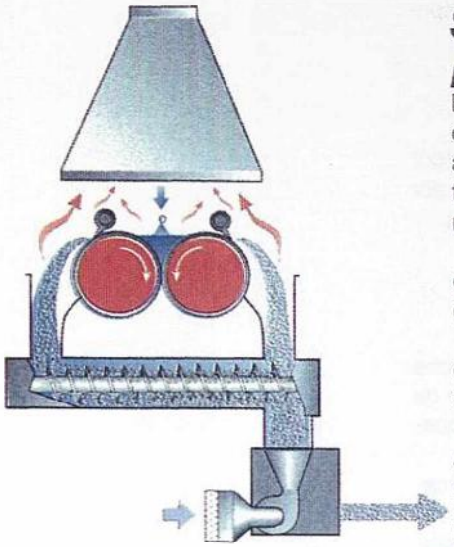


Fig. 17.1 *Principio de trabajo del secador de rodillos alimentado por canal.*

Leche
Medio de calentamiento
Aire para transporte neumático y enfriamiento

Secado en rodillos o en tambor rotatorio

En este tipo de secado, la leche se distribuye sobre rodillos rotatorios calentados con vapor. El agua presente en la leche se evapora y se separa mediante un flujo de aire, cuando está en contacto con la superficie caliente del rodillo. La alta temperatura de las superficies de calentamiento convierte a las proteínas en una forma que no es fácilmente soluble y se produce una decoloración del producto.

Este intenso tratamiento térmico aumenta las propiedades de absorción de agua de la leche en polvo. Esta característica es útil en el caso de utilizar la leche en la industria de alimentos preparados.

Según la forma de alimentar la leche a los rodillos se distinguen dos tipos de secadores: los que tienen la alimentación de la leche sobre el canal que forman ambos rodillos y los que tienen la alimentación por rociado.

La Figura 17.1 muestra el principio de trabajo de un secador de rodillos *con alimentación por canal*. La leche tratada previamente entra al canal formado por los rodillos de hierro fundido y las paredes de los extremos. Se forma una delgada capa de leche sobre los rodillos que se calienta rápidamente al entrar en contacto con la superficie caliente de los mismos. El agua se evapora y la delgada capa de leche que se tiene sobre la superficie del tambor se seca. Esta capa se rasca de forma continua mediante cuchillas que entran en contacto con la periferia de cada rodillo o tambor.

La leche deshidratada cae sobre un transportador de tornillo en el que se muele hasta reducirse a hojuelas. Estas hojuelas o "flakes" se pasan a continuación a un molino donde se reducen a polvo, procediendo al mismo tiempo a la separación de partículas duras y quemadas por medio de un tamiz.

Dependiendo de la capacidad, el secador de doble rodillo es de 1.06 m de largo, y tiene un diámetro de 0.6-3 m. El tamaño depende del espesor de la capa, temperatura, velocidad del tambor y del contenido de MS requerido en el producto seco final.

El espesor de la capa de producto seco puede variarse ajustando el espacio existente entre los rodillos.

La Figura 17.2 muestra el principio de funcionamiento de un secador de rodillo con *alimentación por rociado*. Las boquillas colocadas encima de los tambores rocían la leche formando una delgada capa de leche pretratada sobre las superficies calientes de los rodillos. Con esta solución de distribución, se utiliza casi el 90% del area de transferencia térmica, lo que contrasta con lo que ocurre en el tipo de secador alimentado con canal, donde la superficie empleada es menos del 75%.

El espesor de la capa viene determinado por la presión de suministro a las boquillas de rociado. El tiempo de secado puede ser también controlado ajustando la temperatura y la velocidad de los rodillos. De esta forma se pueden controlar las características del polvo dentro de ciertos límites. Si los parámetros de proceso son correctos, la capa de leche debe estar casi seca cuando es rascada de los rodillos.

Dicha capa seca después de rascada de los rodillos se somete al mismo tratamiento que se ha visto para la obtenida en el secador de rodillos alimentado con canal.

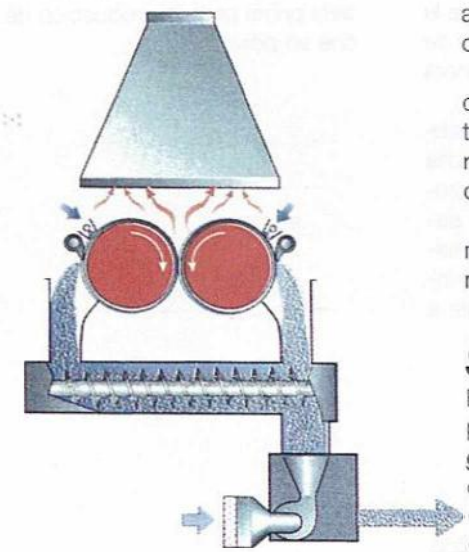


Fig. 17.2 *Principio de trabajo del secador de rodillos alimentado por rociado.*

Leche
Medio de calentamiento
Aire para transporte neumático y enfriamiento

Secado por atomización

El secado por atomización se realiza en dos etapas. En la *primera* de ellas, la leche pretratada se *evapora* hasta alcanzar un contenido de MS del 45-55%. En la *segunda* etapa, el concentrado se bombea hasta una *torre de atomización* para su secado final. Este proceso se realiza en tres fases:

- Dispersión del concentrado en gotas muy finas.
- Mezcla del concentrado finamente disperso en una corriente de aire caliente que evapora el agua de forma rápida.
- Separación de las partículas secas de leche del aire de secado.

La evaporación es una etapa de producción necesaria si se quiere obtener un polvo de alta calidad. Las partículas de polvo serán muy pequeñas y tendrán un alto contenido en aire, pobre capacidad de humectación y una vida comercial corta, si la leche se atomiza sin proceder antes a una concentración previa. Por otra parte, el proceso también sería antieconómico.

En esta concentración previa se utilizan generalmente los evaporadores de película descendente, con dos o más efectos, para alcanzar un contenido de MS del

45-55%. El equipo es el mismo que se utiliza en la producción de leche concentrada.

Instalaciones básicas de secado

Secado en una etapa

La instalación más simple para la fabricación de leche en polvo ordinaria sería la compuesta por el atomizador y un sistema de transporte neumático (Figura 17.3).

El sistema trabaja sobre el principio del secado en una sola etapa, lo que significa que toda la eliminación de humedad del concentrado hasta conseguir el contenido final de humedad requerido tiene lugar en la cámara del atomizador (1). El siguiente sistema de transporte neumático sirve sólo para recoger el polvo saliente de la parte cónica de la cámara junto con la fracción de polvo separada del aire saliente en el ciclón principal (6), para enfriar el polvo y alimentarlo, pasando por el ciclón final (7), a la tolva de envasado.

Secado en dos etapas

En el sistema de secado en dos etapas, que produce el mismo tipo de leche en polvo que la que produce la instalación anteriormente discutida, el sistema de transporte neumático es reemplazado por un secador de lecho fluidizado, cuyo principio de trabajo se discute posteriormente en el apartado "Principio de operación del secado por atomización".

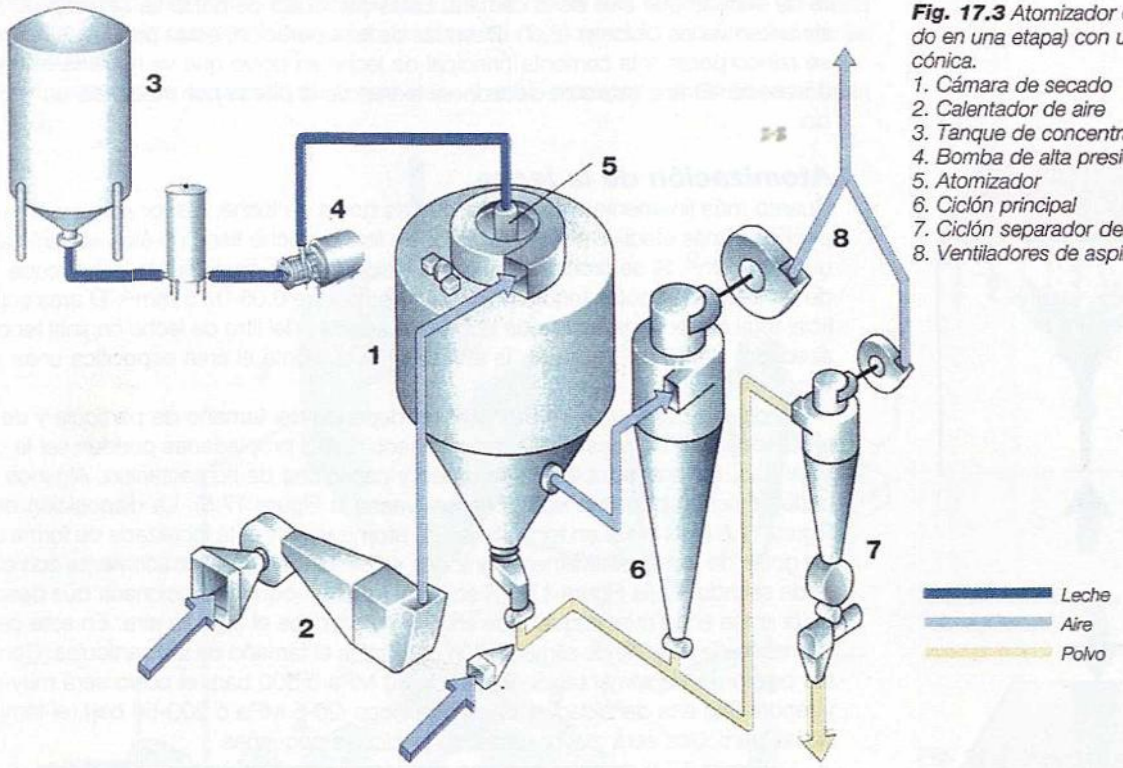


Fig. 17.3 *Atomizador convencional (de secado en una etapa) con una cámara de base cónica.*
1. Cámara de secado
2. Calentador de aire
3. Tanque de concentrado de leche
4. Bomba de alta presión
5. Atomizador
6. Ciclón principal
7. Ciclón separador del sistema de transporte
8. Ventiladores de aspiración de aire y filtros.

Secado en tres etapas

El secado en tres etapas es una extensión del concepto de secado en dos etapas desarrollado para conseguir incluso mayores ahorros en cuanto a costes de operación en la planta.

Principio de operación del secado por atomización

Secado en una etapa

La Figura 17.3 muestra la disposición de una planta de secado en una etapa. La leche concentrada se alimenta a la cámara de secado (1), por medio de una bomba de alta presión (4), y continua después hacia el atomizador (5). Las pequeñas gotitas de leche que se forman se atomizan en la cámara de mezcla, donde entran en contacto con el aire caliente.

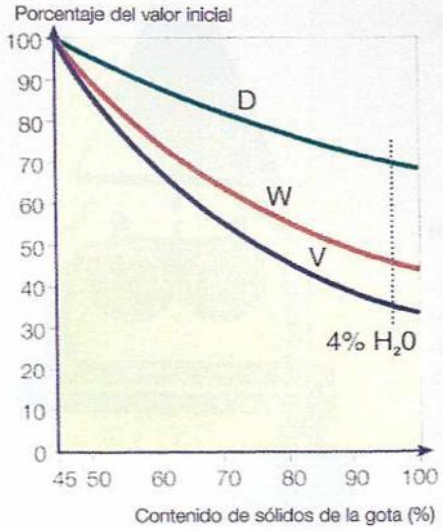


Fig. 17.4 *Disminución de peso, volumen y diámetro de las gotas bajo condiciones ideales de secado, hasta un 4% de H_2O).*
D = Diámetro
W = Peso
V = Volumen

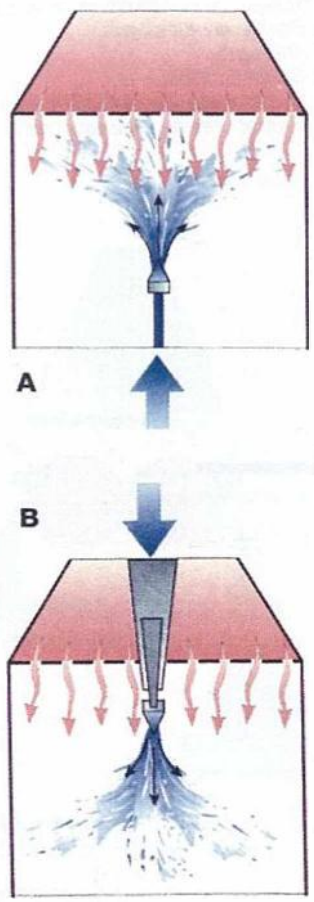


Fig. 17.5 *Boquillas estacionarias para atomización de la leche en una cámara de secado por atomización.*
A Boquilla de flujo a contracorriente
B Boquilla descargando en la dirección del flujo de aire.

Se hace entrar aire mediante un ventilador, a través de un filtro y haciéndose pasar por un calentador (2), donde su temperatura se eleva hasta 150-250ºC. El aire caliente fluye a través de un distribuidor hacia la cámara de mezcla. En dicha cámara, la leche atomizada se mezcla de forma continua con el aire caliente y el agua presente en la leche se evapora. La mayor parte del secado tiene lugar conforme las gotitas son deceleradas por la fricción con el aire que sale a continuación del atomizador a alta velocidad. La evaporación del agua libre se produce de forma instantánea. El agua en los capilares y poros debe difundirse en primer lugar hacia la superficie de las partículas, antes de poder ser evaporada. Esto se produce cuando el polvo se sedimenta lentamente en la torre de atomización. La leche sólo se calentará hasta 70-80ºC, porque el calor del aire se consume de forma continua por la evaporación del agua.

Las pérdidas de agua de las gotitas produce una considerable reducción de peso, volumen y diámetro. Bajo condiciones ideales de secado, el peso se reducirá hasta aproximadamente el 50%, el volumen hasta el 40%, y el diámetro hasta alrededor del 75% del tamaño de la gotita producida en el atomizador (Figura 17.4).

Durante el proceso de secado, la leche en polvo se sedimenta en la cámara de secado y se descarga por el fondo de la misma. El transporte hasta la sección de envasado se hace de forma neumática, con aire de enfriamiento que entra en el sistema de transporte impulsado por un ventilador. Después del enfriamiento, la mezcla de aire de enfriamiento y polvo fluye hasta la unidad de descarga (7), donde el polvo se separa del aire de enfriamiento, antes de proceder a su envasado.

Algunas partículas pequeñas y ligeras pueden permanecer mezcladas con el aire de secado que sale de la cámara. Estas partículas de polvo se separan utilizando uno o varios ciclones (6, 7). Después de la separación, estas partículas de polvo se reincorporan a la corriente principal de leche en polvo que va hacia la etapa de envasado. El aire limpio de secado se extrae de la planta por medio de un ventilador.

Atomización de la leche

Cuanto más finamente dispersas están las gotas de leche, mayor será su área específica y más efectivo será el secado. Un litro de leche tiene un área superficial de unos 0.05 m^2. Si se procede a la atomización de esta cantidad de leche, cada una de las pequeñas gotas tendrá un área superficial de 0.05-0.15 mm^2. El area superficial total de todas las gotas de leche procedentes del litro de leche original tendrán alrededor de 35 m^2. Por ello, la atomización aumenta el área específica unas 700 veces.

El diseño del equipo de atomización depende del tamaño de partícula y de las propiedades requeridas en el producto seco. Estas propiedades pueden ser la granularidad, textura, solubilidad, densidad y capacidad de humectación. Algunos secadores tienen boquillas estacionarias (vease la Figura 17.5). La disposición de la Figura 17.5 A se utiliza en torres bajas de atomización y está localizada de forma que las gotas de leche relativamente grandes se descargan en contracorriente con el aire de secado. En la Figura 17.5 B se muestra una boquilla estacionaria que descarga la leche en la misma dirección en que se produce el flujo de aire. En este caso, la presión de la leche de alimentación determina el tamaño de las partículas. Con altas presiones de alimentación (hasta de 30 MPa ó 300 bar), el polvo será muy fino y tendrá una alta densidad. A bajas presiones (20-5 MPa ó 200-50 bar), el tamaño de las partículas será mayor y libre de partículas pequeñas.

La Figura 17.6 muestra otro tipo muy común de atomizador, que consta de un disco rotatorio con pasos por los que la leche sale a alta velocidad. En este caso las propiedades del producto están controladas por la velocidad de rotación del disco. Puede variar entre 5.000 y 25.000 revoluciones por minuto.

Secado en dos etapas

Las últimas trazas de humedad son las más difíciles de eliminar, a menos que se utilicen altas temperaturas de salida para suministrar una suficiente fuerza inductora de secado. Como las elevadas temperaturas de secado pueden tener un efecto negativo sobre la calidad de la leche en polvo, es esencial funcionar con los productos lácteos a las temperaturas de salida más bajas. Si el contenido de humedad del polvo resultante es aún demasiado alto, se incorporará una etapa de secado de acabado que se dispone después del atomizador, formado así un proceso de secado en dos etapas, tal como se ilustra en la Figura 17.7.

Los métodos de secado en dos etapas para la producción de productos lácteos en polvo combinan la atomización, como primera etapa, y el secado en lecho fluidizado como segunda etapa.

El contenido de humedad del polvo saliente de la cámara es un 2-3% más alto que el contenido de humedad final. La función del secador de lecho fluidizado es eliminar el exceso de humedad y finalmente enfriar el polvo obtenido.

El secado de la leche en dos etapas se desarrolló inicialmente para obtener polvos aglomerados según un proceso continuo, pero a principios de los años setenta se adoptó para la obtención de leche en polvo no aglomerada, ya que se obtenía una mejor calidad de producto y se conseguía una mejor economía de proceso.

El polvo obtenido tanto en las instalaciones de simple etapa como en las de doble etapa consta principalmente de partículas simples; es polvoriento y difícil de reconstituir. Existen, sin embargo, algunas ligeras diferencias. Los polvos obtenidos mediante secado en doble etapa son más gruesos debido a que las partículas iniciales son más grandes y a la presencia de algunos aglomerados. Por lo tanto, no es tan polvoriento y puede reconstituirse más fácilmente. Sin embargo, la mayor diferencia entre estos dos tipos de polvo está en las propiedades que vienen determinadas por la exposición al calor durante el secado.

Estas propiedades en cuestión son el índice de solubilidad y el contenido de aire ocluido, ambos más bajos, y la densidad aparente, que es más alta. La temperatura de la gota justo después de la atomización es baja, precisamente ligeramente superior a la temperatura de bulbo húmedo del aire de secado. La temperatura de la partícula se incrementa gradualmente conforme avanza la eliminación de agua, consiguiendo finalmente una temperatura que es inferior a la temperatura de salida del aire (lo baja que sea la temperatura depende del contenido de humedad de las partículas).

Los sistemas de secado de simple etapa y doble etapa se comparan en la Tabla 17.3.

Fig. 17.6 *Disco rotatorio para la atomización de leche en la cámara de secado por atomización.*

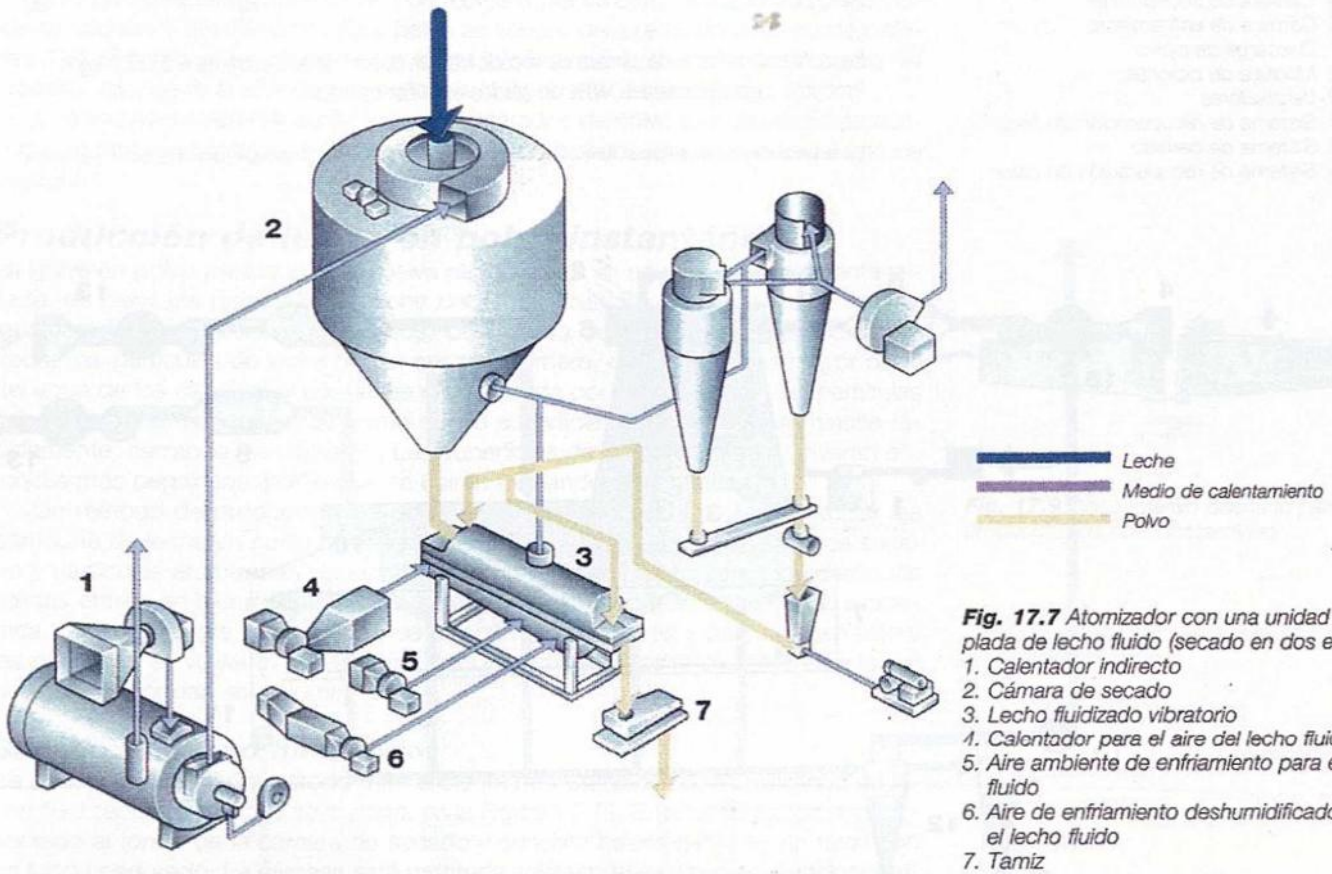


Fig. 17.7 *Atomizador con una unidad acoplada de lecho fluido (secado en dos etapas).*
1. Calentador indirecto
2. Cámara de secado
3. Lecho fluidizado vibratorio
4. Calentador para el aire del lecho fluido
5. Aire ambiente de enfriamiento para el lecho fluido
6. Aire de enfriamiento deshumidificado para el lecho fluido
7. Tamiz

Secado en tres etapas

El secado en tres etapas implica el traslado de la segunda etapa de secado a la base de la cámara del atomizador, realizándose el secado final y el enfriamiento en una tercera etapa localizada fuera de la cámara de secado.

Existen principalmente dos tipos de instalaciones de secado en tres etapas:

1. Atomizadores con lecho fluidizado integrado
2. Atomizadores con cinta integrada

Tabla 17.3
Comparación de los sistemas de secado de una etapa y dos etapas.

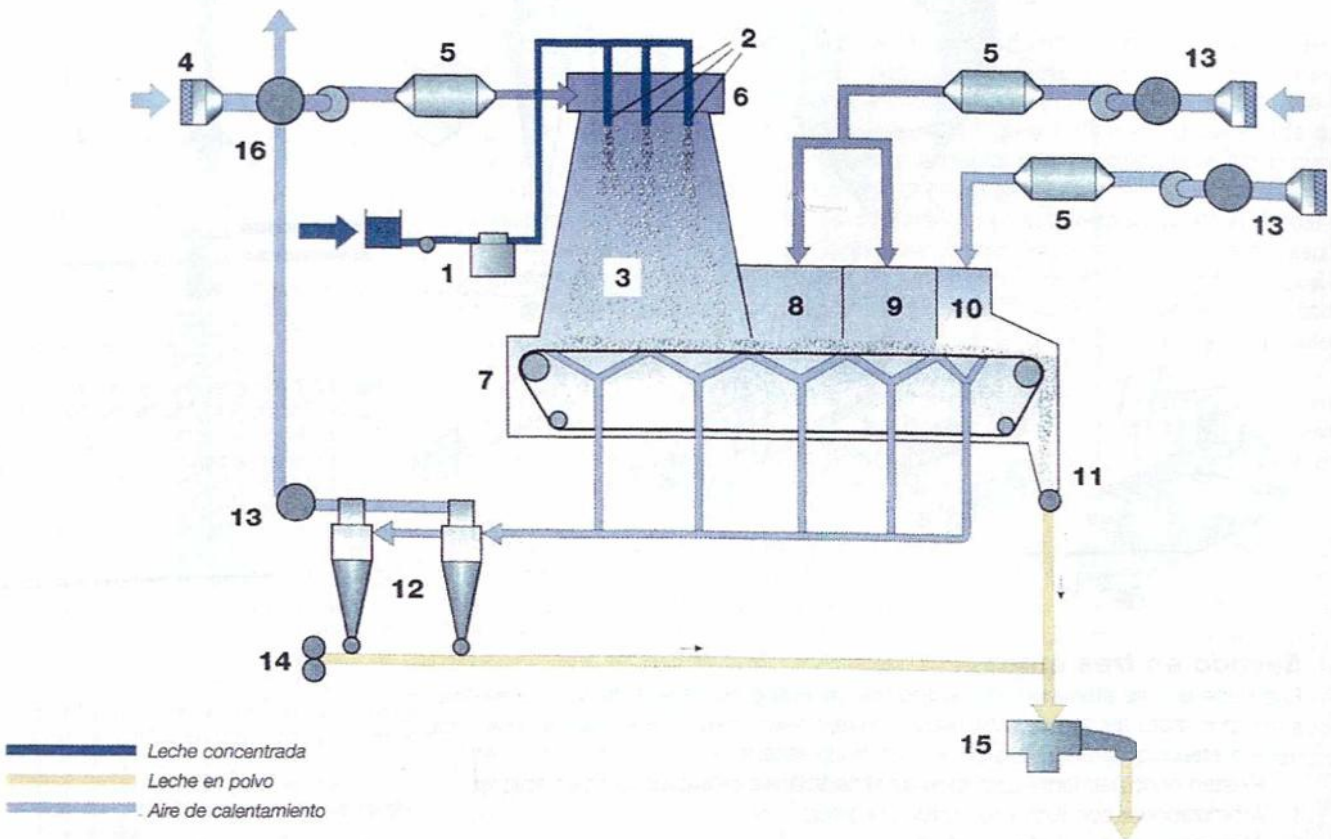
Sistema de secado	**Una etapa Temp. entrada 200°C**	**Dos etapas Temp. entrada 200°C**	**Temp. entrada 230°C**
Atomizador (Primera etapa)			
Evaporación en cámara, kg/h	1 150	1 400	1 720
Polvo saliente de la cámara:			
6% humedad, kg/h	–	1 460	1 790
3.5% humedad, kg/h	1 140	–	–
Consumo energético			
total en atomización, Mcal	1 818	1 823	2 120
Energía/kg polvo, kcal	1 595	1 250	1 184
Lecho fluido (Segunda etapa)			
Aire de secado, kg/h	–	3 430	4 290
Temperatura entrada de aire, °C	–	100	100
Evaporación en lecho fluido, kg/h	–	40	45
Polvo saliente del lecho fluido			
3.5% humedad, kg/h	–	1 420	1 745
Consumo energético, kW	–	20	22
Consumo energético			
total en lecho fluido, Mcal	–	95	115
Total en la planta			
Consumo energético total, Mcal	1 818	1 918	2 235
Energía/kg polvo total, kcal	1 595	1 350	1 280
Ratio de energía	100	85	80

Base: Mismo tamaño de cámara de secado con un caudal de aire entrante = 31.500 kg/h.
Producto: Leche desnatada, 48% de sólidos en el concentrado.

Fuente: Evaporation, Membrane Filtration, Spray Drying - North European Dairy Journal, 1985 Copenhagen, Dinamarca, ISBN 87-7477-000-4

Fig. 17.8 *Atomizador con una cinta transportadora integrada, Filtermat (secado en tres etapas).*

1. *Bomba de alimentación de alta presión*
2. *Disposición de las boquillas*
3. *Cámara de secado primario*
4. *Filtros de aire*
5. *Calentador/enfriador*
6. *Distribuidor de aire*
7. *Montaje de la cinta*
8. *Cámara de retención*
9. *Cámara de secado final*
10. *Cámara de enfriamiento*
11. *Descarga de polvo*
12. *Montaje de ciclones*
13. *Ventiladores*
14. *Sistema de recuperación de finos*
15. *Sistema de cernido*
16. *Sistema de recuperación de calor*



El principio de trabajo del segundo tipo, el atomizador con lecho integrado, se analizará a continuación.

El tipo de secador Filtermat se muestra en la Figura 17.8. Consta de una cámara principal de secado (3) y tres cámaras más pequeñas para cristalización (cuando se necesite, como para la producción de lactosuero en polvo), secado final y enfriamiento (8, 9, 10).

El producto se atomiza por medio de boquillas localizadas en la parte superior de la cámara principal del secador. El producto se transporta hasta las boquillas por medio de una bomba de alta presión. La presión de atomización es hasta de 200 bar. La mayor parte del aire de secado se suministra a la cámara de secado alrededor de las boquillas individuales a temperaturas de hasta 280ºC.

El primer secado de las gotitas tiene lugar conforme caen desde las boquillas (2) hacia la cinta en movimiento (7) localizada en la base de la cámara. El polvo se deposita sobre la cinta formando una capa porosa aglomerada.

La segunda etapa de secado tiene lugar conforme se aspira el aire de secado a través de la capa de polvo. El contenido de humedad del polvo que cae sobre la cinta (7) es del 12-20% dependiendo del tipo de producto. Esta segunda etapa de secado sobre la cinta reduce el contenido de humedad hasta el 8-10%. El contenido de humedad es muy importante para conseguir el grado exacto de aglomeración del producto y la porosidad de la capa de polvo. La tercera y última etapa de secado de los concentrados de leche desnatada y leche entera tiene lugar en dos cámaras (8, 9), donde el aire caliente a una temperatura de entrada de hasta 130ºC se hace pasar a través de la capa de polvo y la cinta de la misma manera que en la cámara principal. El polvo se enfría en la cámara final (10). La cámara (8) se utiliza en casos donde se requiera la cristalización de la lactosa (lactosuero en polvo). En este caso el aire no se transporta hacia la cámara, ya que el contenido de humedad permanece a un nivel más alto, hasta del 10%. La tercera etapa de secado tiene lugar en la cámara (9), y el aire de enfriamiento se suministra a la cámara (10).

Sólo una pequeña cantidad de polvo deja la planta como finos junto con los aires de secado y enfriamiento. Este polvo se separa del aire en una batería de ciclones (12). El polvo se recircula, o bien hasta la cámara principal o hasta un punto del proceso adecuado al tipo de producto y a la aglomeración requerida.

Una vez que salen del secador los aglomerados de polvo se rompen hasta conseguir el tamaño deseado en un tamiz (15) o son molidos, dependiendo del tipo de producto.

Producción de leche en polvo instantánea

La leche en polvo para que se disuelva rápidamente en agua debe ser instantaneizada, es decir las partículas de leche deben ser tratadas de manera que formen aglomerados más grandes y porosos. Con objeto de conseguir la porosidad correcta, las partículas de leche deben secarse primero, de forma que la mayor parte del agua de los capilares y poros sea reemplazada por aire. Después, las partículas deben ser rehumidificadas, de forma que la superficie de las mismas se hinche rápidamente, cerrando los capilares. Las superficies de las partículas se volverán entonces más pegajosas, por lo que se unirán formando aglomerados.

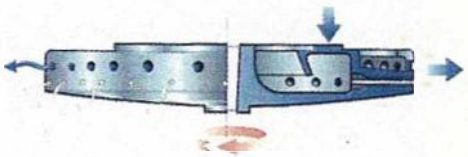


Fig. 17.9 *Disco rotativo diseñado para la producción de polvo instantáneo.*

Un método de producción de polvo instantaneizado consiste en recircular las partículas de leche en polvo hacia la cámara de mezcla que contiene aire de secado y partículas atomizadas de leche (Figura 17.9). Tan pronto como las partículas sólidas entren en dicha cámara, sus superficies se humidifican con el agua evaporada, de manera que las partículas se hinchan. Los capilares y poros se cerrarán y las partículas se volverán pegajosas. Otras partículas de leche se adhieren a la superficie y se forman así aglomerados.

Secado en lecho fluidizado

Se puede conseguir un método más eficiente de instantaneización utilizando un lecho fluidizado del tipo que se muestra en la Figura 17.10. El leche fluidizado está conectado al fondo de la cámara de secado y consiste básicamente en un túnel con un fondo perforado. La carcasa está montada sobre muelles y puede vibrar por medio de un motor. Cuando se distribuye una capa de producto en polvo sobre el fondo perforado, las vibraciones harán que el polvo se desplace a una velocidad uniforme a lo largo de la longitud del túnel.

El polvo procedente de la cámara de secado entra a la primera sección, donde es humidificado con vapor. Las vibraciones transportan al polvo a través de las secciones de secado, donde el aire a temperaturas que decrecen gradualmente pasa a través del lecho de polvo. En la primera etapa de secado se forman aglomerados

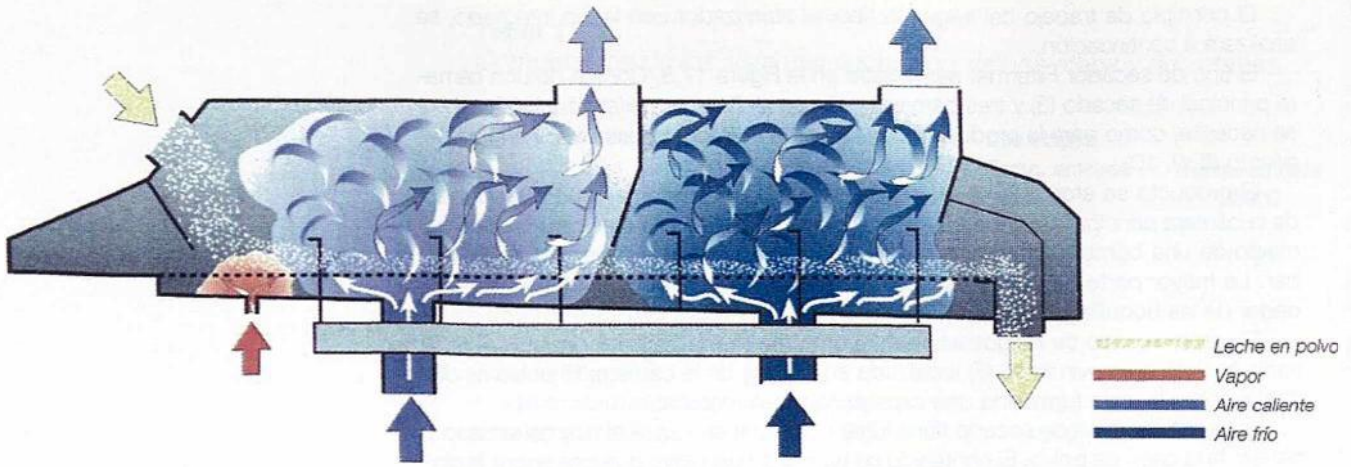


Fig. 17.10 *Lecho fluidizado para instantaneización de leche en polvo.*

por adhesión de unas partículas con otras. El agua presente en dichos aglomerados se evapora durante su paso a través de las secciones de secado. El producto cuando sale de este equipo de lecho fluidizado habrá alcanzado el contenido de humedad requerido.

A la salida del equipo de fluidización se encuentra un tamiz que separa las partículas de mayores dimensiones, que se recirculan a la entrada del equipo. Las partículas instantaneizadas que pasan dicho tamiz son transportadas por aire frío hasta una batería de ciclones, donde son separadas del aire y envasadas posteriormente.

El aire de secado procedente de la cámara de lecho fluido, junto con el aire de la torre de atomización, pasa por un ciclón para la recuperación de las partículas de leche que pudiesen contener.

Recuperación de calor

En el proceso de secado se pierde una gran cantidad de calor. Parte del mismo puede ser recuperado en intercambiadores de calor, pero como el aire de secado contiene polvo y vapor se necesita que dichos intercambiadores sean de un diseño especial.

En muchos casos se utilizan intercambiadores de calor especiales con tubos de vidrio (vease la Figura 17.11). La superficie lisa del vidrio evita en gran medida su ensuciamiento, por formación de depósitos. En la planta se incluye un sistema de limpieza CIP.

El aire caliente se introduce por el fondo, y es forzado a pasar a través de los tubos de vidrio. El aire fresco que se va a calentar fluye por el exterior de dichos tubos. Utilizando este metodo de recuperación de calor, la eficacia energética de la planta de secado por atomización puede aumentarse un 25-30%.

Otra posibilidad más es recuperar el calor contenido en los condensados procedentes de la planta de evaporación. Esta planta funciona en paralelo con la instalación de atomización, por lo que una solución de este tipo es factible consiguiendose un ahorro en los costes energéticos de secado del 5-8%.

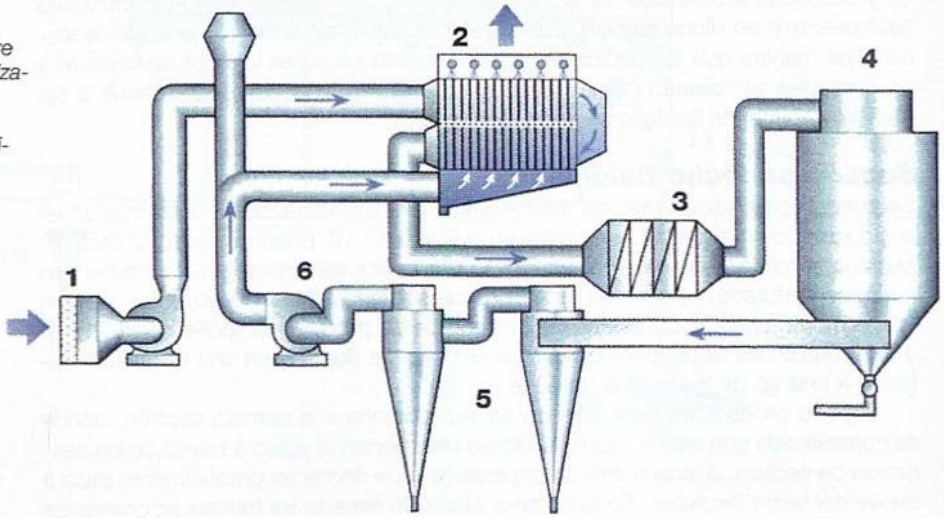


Fig. 17.11 *Recuperación de calor del aire saliente de la planta de secado por atomización.*
1. *Ventilador de aire freco*
2. *Intercambiador de calor de tubos de vidrio.*
3. *Calentador*
4. *Torre de atomización*
5. *Ciclones*
6. *Ventilador para el aire saliente*

Envasado de la leche en polvo

El tipo y tamaño de los envases varía ampliamente de un pais a otro. El polvo se envasa frecuentemente en bolsas laminadas con una capa interior de polietileno. La bolsa de polietileno se suelda normalmente, obteniéndose un envase prácticamente tan estanco al aire como los tambores de lámina metálica. Los tamaños mas frecuentes de las bolsas son de 25 y 15 kg, aunque también se utilizan otros tamaños, ya que es muy fácil variar el peso de polvo contenido en los envases para satisfacer las necesidades específicas de los clientes. La leche en polvo para los hogares y otros consumidores similares de pequeña escala se envasa en latas metálicas, bolsas laminadas o saquitos de plástico, que a su vez se envasan en cajas de cartón.

Cambios en la leche en polvo durante su almacenamiento

La grasa presente en la leche entera en polvo se oxida durante el almacenamiento. A escala industrial el período de conservación puede aumentarse por tratamientos previos especiales de la leche, tales como la adición de antioxidantes, y, en el caso de bidones de láminas metálicas, por envasado en atmósfera de gas inerte.

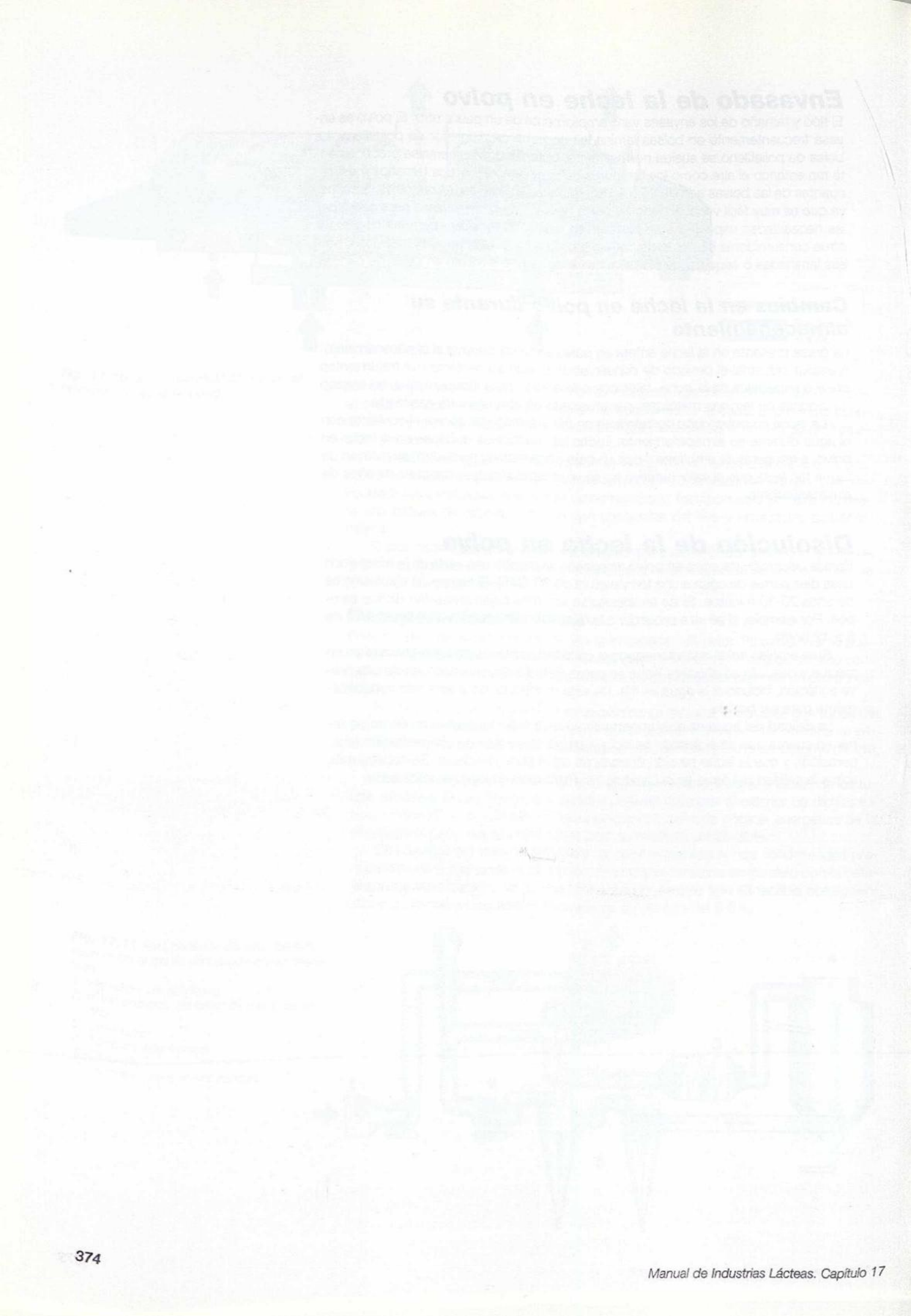
La leche en polvo debe conservarse en frío y protegerse contra el contacto con el agua durante su almacenamiento. Todas las reacciones químicas en la leche en polvo, a temperatura ambiente y con un bajo contenido en humedad, se realizan de forma tan lenta que el valor nutritivo no se ve afectado, incluso después de años de almacenamiento.

Disolución de la leche en polvo

Para la disolución de leche en polvo atomizada se mezcla una parte de la misma con unas diez partes de agua a una temperatura de 30-50°C. El tiempo de disolución es de unos 20-30 minutos. Si las temperaturas son más bajas aumentan dichos tiempos. Por ejemplo, si se va a proceder a la disolución en agua fría, son necesarias de 8 a 12 horas.

Si se emplea polvo instantaneizado la cantidad requerida de agua se vierte en un tanque y después se añade la leche en polvo. Este se disuelve después de una breve agitación, incluso si el agua es fría. De esta manera la leche está lista inmediatamente para ser bebida.

La calidad del agua es muy importante en esta fase de disolución. Se ha de tener en cuenta que en el secado se incluye una primera fase de concentración (evaporación), y que la leche ha sido liberada de agua pura (destilada). Se hablará más sobre la calidad del agua en el Capítulo 18: Productos lácteos recombinados.



Capítulo 18

Productos lácteos recombinados

La leche es un producto perecedero y, por lo tanto, escaso en muchos países con poca o ninguna producción láctea propia. La leche fresca tiene una vida comercial muy limitada y se estropea fácilmente por la acción de enzimas bacterianas y por la exposición directa a la luz del sol. Su distribución es especialmente difícil en países de clima tropical y en regiones donde las distancias entre el productor y el consumidor son grandes. En esos lugares, la leche fresca se reemplaza por formas más duraderas, tales como la leche concentrada o la leche esterilizada UHT.

La recombinación es un método alternativo de suministro de un producto que se parece bastante a la leche fresca para mercados donde no se puede disponer de

esta última. La fabricación de leche y productos lácteos recombinados está bien establecida en diversos países del mundo, por lo que se ha desarrollado una gran variedad de procesos y equipos para este propósito.

Los principios de los procesos son en gran parte los mismos. Inicialmente se aplicaba sobre todo a la leche fluida, pero posteriormente se ha seguido con la producción de leche evaporada recombinada y leche condensada azucarada. En la actualidad la recombinación también incluye productos como el yogur, la mantequilla y el queso.

Los procesos han sido desarrollados a lo largo de los años, desde operaciones simples discontinuas hasta sofisticados sistemas con altas capacidades de producción.

Los procesos principales utilizados en la reconstitución básica y en las operaciones de recombinación son:

- Manejo de materias primas
- Pesado y mezcla
- Filtración, homogeneización y pasteurización

La leche reconstituida es la leche líquida obtenida mediante la adición de agua a la leche desnatada en polvo o leche entera en polvo.

La leche recombinada es la leche líquida obtenida mediante la adición de agua a la leche desnatada en polvo y la adición por separado de grasa láctea en tal cantidad que se consiga el contenido graso deseado.

Definiciones

A continuación se dan toda una serie de definiciones a modo de guía para clarificar ciertas expresiones que se utilizan habitualmente en la industria.

Leche reconstituida es la leche líquida obtenida por la adición de agua a la leche desnatada en polvo o a la leche entera en polvo.

Leche recombinada es la leche liquida resultante de la adición de agua a leche en polvo desnatada, agregándose grasa láctea en cantidad tal que se alcance el contenido graso deseado.

Productos lácteos reconstituidos son los que resultan de la adición de agua al producto en forma seca o concentrada, en las cantidades necesarias para restablecer la proporción especificada agua/sólidos.

Productos lácteos recombinados son los fabricados por mezcla de grasa láctea y sólidos lácteos no grasos (SLNG), con o sin agua. La combinación debe hacerse de forma tal que se restablezcan los ratios especificados: contenido graso/SLNG y MS/agua.

Leche y productos lácteos modificados recombinados son aquellos hechos a partir de ingredientes lácteos, con composición distinta a la normal de los productos lácteos, como por ejemplo productos aromatizados, mantequilla procedente de grasa fraccionada, o leche concentrada o evaporada dietética.

Leche y productos lácteos de imitación son aquellos en los que la grasa láctea es sustituida por aceites vegetales, como leche líquida, leche evaporada, queso o leche condensada. Se les llama también productos de sustitución.

Leche enriquecida es la fabricada a partir de leche fresca, leche reconstituida o recombinada, con la adición de uno o más ingredientes de productos lácteos.

Leche acentuada, es leche fresca mezclada con leche desnatada reconstituida o recombinada, con objeto de preparar leche de composición normal o leche modificada a partir de leche de alto contenido graso por ajuste de los SLNG.

Grasa láctea anhidra (GLA) es un producto graso puro obtenido a partir de leche fresca, nata o mantequilla, sin la adición de sustancias neutralizantes.

Aceite de mantequilla anhidro es un producto totalmente graso obtenido a partir de nata o mantequilla que pueden ser de diferentes fechas de fabricación.

Aceite de mantequilla es el producto obtenido a partir de nata o mantequilla, que pueden ser de diferentes fechas de fabricación, pudiendo tener un contenido graso inferior.

Aceites vegetales son aquellos que han sido refinados, blanqueados y desodorizados, y que su procedencia puede ser de soja, palma o coco.

Manejo de materias primas

Leche en polvo

Los sólidos no grasos para la leche recombinada se suelen suministrar en la forma de leche en polvo desnatada. Esta se hace por eliminación de la nata de la leche entera en separadoras centrífugas, y posteriormente se elimina el agua de la leche desnatada por medio de evaporación y secado. El polvo obtenido puede ser almace-

nado durante meses e incluso años, sin que se estropee, disolviéndose fácilmente en agua para formar leche desnatada reconstituida.

El método más comúnmente utilizado para clasificar la leche en polvo desnatada se refiere a la técnica de procesado, y por lo tanto al tratamiento térmico al que ha sido sometida la leche desnatada antes de su evaporación y de su secado por atomización.

Durante el tratamiento térmico de la leche las proteínas del suero se desnaturalizan en diferentes grados, dependiendo de la relación temperatura/tiempo. El grado de desnaturalización puede clasificarse según el llamado Indice de Nitrógeno Proteico del Suero (INPS), que se ha discutido en el Capítulo 17.

Tabla 18.1

Leches desnatadas en polvo para la elaboración de productos reconstituídos y recombinados.

Calidades típicas de la leche en polvo.

Tipo y Características	**Tratamiento térmico**					
	Extra bajo	**Bajo**	**Medio**	**Medio alto**	**Alto**	**Alto**
	Extra LH	**LH**	**MH**	**MHH**	**HH**	**HHHS***
	<70°C/15s	**70°C/15s**	**85-90°C/20-30s**	**96-124°C/30s**	**≈ 135°C/30s**	
Índice INPS, mg/g	–	>6.0	5.9 – 4.5	4.4 – 1.5	<1.4	<1.4
Nivel térmico	–	<80.0	80.1 – 83	83.1 – 88.0	>88.1	>88.1
Producto recombinado						
Queso duro	Libre de antibóticos buena capacidad de coagulación					
Queso semiduro	Libre de antibióticos buena capacidad de coagulación					
Queso blanco/Feta	Libre de antibióticos, buena capacidad de coagulación					
Queso fresco	Libre de antibióticos, buena capacidad de coagulación					
Leche pasteurizada		Libre de antibióticos				
Leche UHT			Bajo recuento de UCF:<5 x 10^5/ml			
Leche esterilizada			Libre de antibióticos			
Leche condensada azucarada		Libre de antibióticos				
Leche evaporada o concentrada					Libre de antibióticos	
Leches acidificadas		Libre de antibióticos				
Helado de crema estándar		Libre de antibióticos				

* Polvo muy estable con tratamiento térmico elevado de leche especialmente seleccionada

Los diferentes productos lácteos recombinados requieren normalmente diferentes tipos de leche en polvo desnatada, según su tratamiento térmico (ver la Tabla 18.1).

La leche en polvo se suministra normalmente en sacos laminados recubiertos de plástico, de 25 kg.

En las plantas más pequeñas la leche en polvo se vacía normalmente a mano directamente desde los sacos al sistema de mezcla, pero en las plantas grandes los sacos se vacían automáticamente. Más sofisticado es incluso el uso de tanques silo que se llenan vaciando los sacos y transfiriendo su contenido neumáticamente al silo.

Existen también métodos racionales para el transporte de la leche en polvo a las plantas de recombinación en grandes bidones de 200-1000 kg. El tamaño de estos envases viene limitado por los sistemas de manejo de que se disponga en la planta receptora.

Grasas y aceites

La mantequilla no salada se puede utilizar en la fabricación de productos lácteos recombinados, pero se debe mantener en almacenamiento refrigerado.

La fuente más común de grasa láctea para recombinación es la grasa láctea anhidra (GLA), que no requiere tal tipo de almacenamiento. Se envasa normalmente

en latones de 19.5 kg o bidones de 196 kg. Dado que se lleva especial cuidado en la fabricación del producto, y que el aire se excluye mediante el envasado del producto con gas inerte (nitrógeno), la GLA se mantendrá durante 6-12 meses incluso a elevadas temperaturas ambientales de 30-40°C.

La grasa láctea envasada en latas se puede fundir por inmersión en agua caliente a 80°C durante 2-3 horas. Los bidones de GLA, sin embargo, requieren mayores tiempos de fundido. El método normal es almacenar los bidones en cámaras calientes a 45-50°C durante 24-28 horas antes de su uso, o se puede utilizar una cámara de vapor o túnel donde se puede fundir el contenido en unas 2 horas. Una vez fundida la GLA debe ser transferida a un tanque encamisado con dispositivos para el mantenimiento de la temperatura.

Sistemas de manejo similares se pueden emplear cuando se utilizan aceites vegetales no líquidos en la producción de productos lácteos "de imitación" recombinados.

Agua

El agua es una de las materias primas de todos los tipos de productos lácteos reconstituidos y recombinados. Debe ser potable y de alta calidad, libre de microorganismos patógenos y con una aceptablemente baja dureza expresada como carbonato cálcico ($CaCO_3$), por ejemplo < 100 mg/l, que se corresponde a unos 5°dH. Como sólo se elimina agua "destilada" en la producción de leche en polvo, el agua que se utiliza en la reconstitución o recombinación debe ser también pura; un excesivo contenido de sales minerales estropeará el equilibrio salino del producto reconstituido o recombinado, que a su vez causará problemas en la pasteurización, sin mencionar la esterilización o el tratamiento UHT.

Un contenido demasiado alto en cobre o hierro en el agua puede provocar sabores anormales resultantes de la oxidacion de la grasa. Por ello, los niveles máximos recomendados son:

- Cobre (Cu) 0.05 mg/l
- Hierro (Fe) 0.1 mg/l

Ver también el capítulo 6.11, Tabla 6.11.1 sobre las especificaciones del agua.

Aditivos

Los aditivos secos como el azúcar, los estabilizantes y los emulsionantes se pueden manejar de la misma manera que la leche en polvo. Por ejemplo, se pueden vaciar desde los sacos directamente en el envase de mezcla o en el sistema de mezclado.

Disolución de la leche en polvo

Los factores que afectan a la disolución de la leche en polvo son:

- La humectabilidad del polvo
- La facilidad de sedimentación del polvo
- La facilidad del polvo para dispersarse
- La solubilidad del producto en polvo.

Los factores que afectan la disolución de la leche en polvo son:
- humectabilidad
- abilidad de hundirse
- dispersabilidad
- solubilidad

Los métodos analíticos para la determinación de estas propiedades vienen dados en:

- Standards for Grades of Dry Milk, que incluyen los Métodos de Análisis, del American Dry Milk Institute, Inc., USA.
- Evaporación, Filtración con Membranas y Secado por Atomización en la Fabricación de Leche en Polvo y Queso, que viene en la publicación North European Dairy Journal, de Dinamarca.

Humectabilidad

El grado de humectabilidad es, en gran parte, función del volumen de las partículas y especialmente de la capilaridad.

Los polvos aglomerados tienen una buena capilaridad, resultando en una mejora en su humectabilidad. Cuando el tamaño de las partículas aumenta (130-150 μm), también aumenta su humectabilidad. Una buena humectabilidad es aquella cuyo tiempo es inferior a 30 segundos.

Facilidad de sedimentación

La facilidad para sedimentarse es función del volumen específico y del tamaño de partícula. Los polvos aglomerados normalmente son los que mejor sedimentan.

Facilidad de dispersión

Los polvos fáciles de dispersar son aquellos que cuando se añaden al agua se distribuyen en partículas aisladas, sin formación de grumos. La estructura de las partículas del polvo, así como la configuración de las moléculas de proteína, juegan un papel importante. Un producto en polvo con un alto contenido en proteínas desnaturalizadas es muy difícil de dispersar. Un grado de dispersabilidad mínimo del 90% es normal en las leches en polvo para recombinación.

Solubilidad

Esta propiedad indica la facilidad del producto en polvo para disolverse y formar una suspensión estable. El grado de solubilidad de un producto en polvo depende en gran medida de la tecnología usada en su proceso de producción.

Un buen índice de solubilidad se corresponde con una cantidad de sedimentos no disueltos tan baja como 0.25 ml en 50 ml de leche recombinada.

Temperatura de recombinación y tiempo de hidratación

La humectabilidad del polvo aumenta cuando la temperatura del agua se incrementa de 10 a 50ºC. Pero, no se produce aumento entre 50 y 100ºC, más bien al contrario. El polvo de bajo tratamiento térmico es más fácil de disolver que el de alto tratamiento térmico. Es importante que las proteinas alcancen su estado normal de hidratación, que se completa en menos de 20 minutos a una temperatura de 40-50ºC.

Como regla, se puede decir que el producto en polvo fresco y de alta calidad requiere el menor tiempo de hidratación. Un tiempo de hidratación insuficiente puede conducir a la aparición de un sabor a cal en el producto final. A la leche recombinada que se va a utilizar en la elaboración de quesos se le debe dar un tiempo de hidratación de dos horas.

El contenido de aire de la leche reconstituida se incrementa a temperaturas bajas de mezcla.

Se puede hacer la reconstitución a 10ºC y proceder después al almacenamiento de la leche a esta temperatura durante la noche, con objeto de alcanzar la máxima hidratación. Sin embargo, cuando se trabaja a temperatura de mezcla de 10-20ºC, quedan más partículas de polvo sin disolver que cuando se trabaja a 35-45ºC, incluso si la mezcla se mantiene durante 24 horas. En la leche con el 8% de sólidos la diferencia es muy pequeña. Después de la reconstitución de leche que se calienta a más de 40ºC, la proporción de polvo sin disolver es muy pequeña, incluso en mezclas con 26% de sólidos secos.

El contenido de aire de la leche reconstituida aumenta cuando la mezcla se realiza a bajas temperaturas.

La grasa debe añadirse a una temperatura por encima de su punto de fusión. Para asegurar esto la adición de grasa láctea anhidra debe realizarse a una temperatura superior a 40ºC. La leche recombinada no debe mantenerse a temperaturas altas de mezcla durante más de dos horas, ya que se puede producir un desarrollo bacteriano.

Adición de grasa y emulsión

No se debe añadir la grasa a la leche reconstituida hasta que se haya completado el período de hidratación. Se debe evitar realizar la adición de la grasa al mismo tiempo o antes que la leche en polvo, ya que esto puede originar problemas en el proceso y deteriorar la calidad del producto.

La grasa láctea se suele añadir junto con un emulsionante para facilitar y mejorar la emulsión de aquella.

Cuando la grasa se añade a la leche en un depósito de mezcla se debe tener agitación intensa y continua, a menudo con un agitador potente, para asegurar que la composición del producto sea uniforme cuando se bombea al pasteurizador. Incluso cuando se integra un homogeneizador en el sistema, es importante que la grasa se distribuya uniformemente en la leche.

La nata recombinada puede obtenerse a partir de leche en polvo desnatada o mazada en polvo y grasa láctea, hasta alcanzar un contenido graso de un 40% aproximadamente. Se mejora la estabilidad por la adición de emulsionantes y estabilizantes.

En los procesos continuos la grasa fundida puede dosificarse en la línea seguido de una mezcla continua en una mezcladora estática u operada mecánicamente, antes de entrar en el homogeneizador.

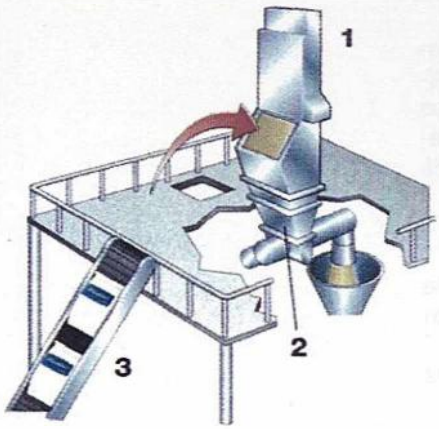


Fig. 18.1 *Equipo para el manejo de sacos en polvo.*
1. Unidad colectora de finos
2. Cedazo
3. Elevador de sacos

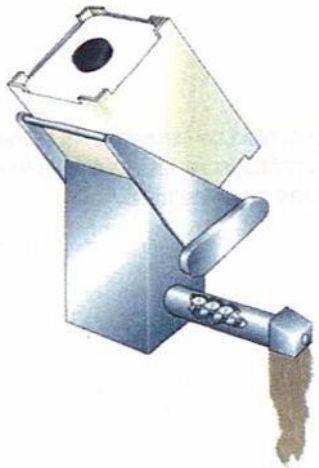


Fig. 18.2 *Bastidor de inclinación de contenedores de polvo.*

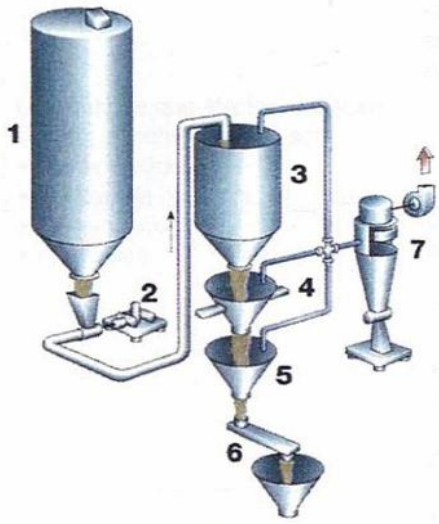


Fig. 18.3 *Equipo para el manejo de polvo a granel en grandes plantas de proceso.*
1. Silo de leche en polvo
2. Ventilador
3. Tolva abierta
4. Tolva de pesado
5. Tolva
6. Alimentador
7. Filtro de finos

Contenido en aire

La leche en polvo desnatada contiene normalmente un 40% de aire en volumen, aproximadamente, siendo básicamente aire ocluido e intersticial. El equipo de mezcla puede causar una adición de aire si no se mantiene adecuadamente.

En pruebas efectuadas se ha visto que el contenido en aire de la leche desnatada reconstituida y disuelta a 50ºC, con unos sólidos del 14 al 18%, es el mismo que el de la leche desnatada normal. Cuando la temperatura de mezcla es de 30ºC el contenido en aire es un 50-60% mayor incluso después de un período de mantenimiento de una hora. Con un 41% de sólidos, el contenido en aire de la mezcla era 10 veces mayor que el de la leche desnatada normal.

Si hay demasiado aire presente en la leche recombinada pueden aparecer los siguientes problemas:

- formación de espuma
- quemado en el pasteurizador
- cavitación en el homogeneizador
- formación de suero en los productos lácteos acidificados
- aumento del riesgo de oxidación de la grasa

Como la recombinación va acompañada con formación de espuma, el volumen de los tanques de mezcla debe ser un 20% mayor que el volumen del lote a tratar, para evitar que la espuma provoque el rebose de producto.

Manejo de los productos en polvo

La dosificación de la leche desnatada en polvo se basa en una regla muy simple: el peso del polvo es un décimo del peso de la leche que se quiere obtener. En plantas pequeñas, la forma más práctica y fácil de realizar esta mezcla es mediante el vaciado manual de un determinado número de sacos con un peso dado, en los depósitos de mezcla. Para producciones superiores se puede mecanizar el proceso.

El manejo de la leche en polvo provoca grandes polvaredas. Por ello, para el vaciado de sacos a gran escala se necesitan equipos especiales, incluida una unidad colectora del polvo formado (Figura 18.1).

El producto en polvo puede suministrarse también en contenedores. En este caso, el equipo adecuado para ello incluye un alimentador de tornillo de velocidad variable, que coge el polvo del fondo del contenedor y lo descarga en una tolva de mezcla. El contenedor puede ser elevado hasta la posición adecuada mediante un dispositivo de volteo (Figura 18.2), o por una grúa.

En las plantas altamente mecanizadas, el polvo se recoge a granel, se almacena en silos y se transporta neumáticamente hasta una tolva que recoge la cantidad que se va a procesar en un día. Desde dicha tolva, el producto pasa a un depósito con equipo de pesado y después a un tornillo alimentador. Este sistema (figura 3) incluye también una unidad central para la recogida del polvo.

Diseño de plantas de recombinación

Las plantas de recombinación se construyen para capacidades de hasta 15.000 l/h. En las plantas más grandes se instalan líneas en paralelo con objeto de alcanzar capacidades mayores.

La secuencia en una planta de proceso grande es esencialmente la misma que en una pequeña, excepto que se necesitan más depósitos para almacenamiento y fusión de la grasa, mezcla y almacenamiento de regulación de producto acabado. El grado de mecanización puede también variar tal como se ha indicado anteriormente.

En grandes plantas de proceso es necesaria la utilización de tanques de pesado para la dosificación de la grasa, con objeto de conseguir la precisión necesaria. En plantas más pequeñas, el tanque de pesado es a menudo reemplazado por una bomba dosificadora.

Desaireación

En plantas pequeñas, donde la mezcla de los materiales es suficiente realizarla en un tanque de proceso, el producto se desaireará de forma natural y satisfactoriamente si se ha mantenido una temperatura de reconstitución de aproximadamente 40ºC y, cuando todo el polvo se ha disuelto, la solución resultante se permite que permanezca durante 20 minutos con el agitador desconectado.

El mismo procedimiento se debe aplicar también en las plantas de producción a gran escala. Para mantener una producción ininterrumpida, sin embargo, es acon-

sejable desairear el producto por tratamiento a vacío en conexión con el tratamiento térmico.

Tratamiento térmico

El diseño de la planta se ve influenciado no sólo por su capacidad sino también por el método seguido en el tratamiento térmico de la leche recombinada. Se utilizan tres métodos alternativos:

- Pasteurización a una temperatura de al menos 72°C durante 15 segundos seguido de un enfriamiento inmediato hasta 4°C.
- Esterilización de la leche envasada durante 30 a 45 minutos, a aproximadamente 110°C seguido de un enfriamiento a 38-54°C en el esterilizador.
- Tratamiento UHT mediante calentamiento directo o indirecto a 132-149°C durante pocos segundos, seguido de enfriamiento a aproximadamente 20°C antes de su envasado aséptico

Planta con suministro de grasa a los depósitos de mezcla

Producción a pequeña escala

En plantas pequeñas, de 1.000 a 2.000 l, la mezcla y el procesado se realizan en un tanque de mezcla encamisado, provisto de un agitador de dos velocidades, y con dispositivos de calentamiento y enfriamiento.

La planta se muestra en la Figura 18.4.

Una vez que se ha medido un volumen adecuado de agua en el tanque y se ha calentado ésta hasta 43-49°C, se añade el polvo poco a poco y se aplica agitación hasta que todo el polvo se ha disuelto. La solución resultante debe permanecer durante 20 minutos con el agitador desconectado. Al final de este tiempo, el agitador se vuelve a poner en marcha y la grasa láctea, previamente licuada mediante calentamiento en cámara caliente a 38-45°C durante una noche, se adiciona y se aumenta la temperatura a continuación hasta 54-65°C. Si se va a continuar el proceso en el tanque, el agitador se conecta a alta velocidad durante algunos minutos para dispersar la grasa. El agitador se pone a continuación en la posición de agitación, y el proceso concluye con la pasteurización seguida de enfriamiento hasta la temperatura de envasado.

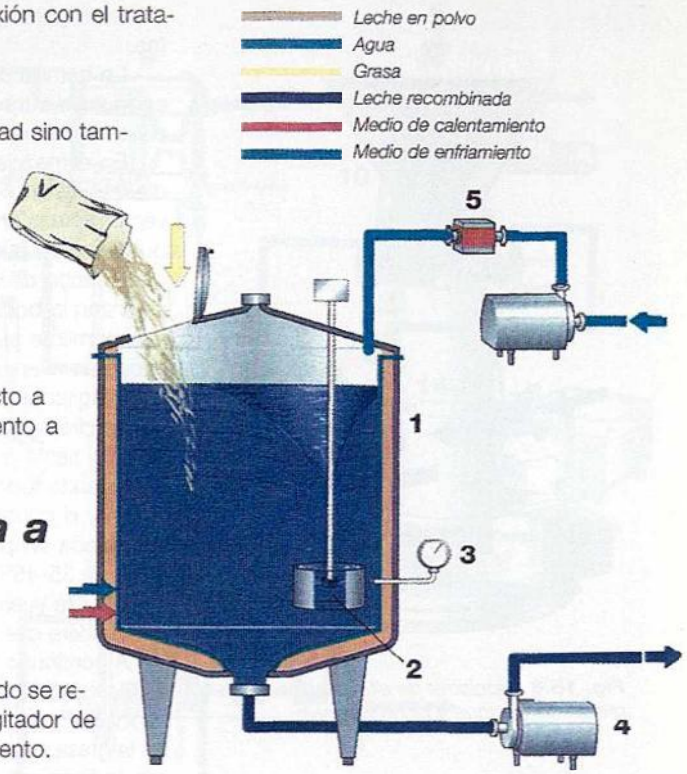


Fig. 18.4 *Planta de recombinación de procesado discontinuo.*
1. Tanque de mezcla con camisa de calentamiento/enfriamiento
2. Agitador de dos velocidades de gran potencia
3. Termómetro
4. Bomba de descarga
5. Caudalímetro

Producción a gran escala

La Figura 18.5 muestra una planta de recombinación para grandes capacidades de trabajo, donde la grasa se dosifica en los depósitos de mezcla.

En uno de los tanques de mezcla (7) se dosifica agua potable. Antes de entrar en el tanque, el agua se calienta en un intercambiador de calor de placas, ya que la

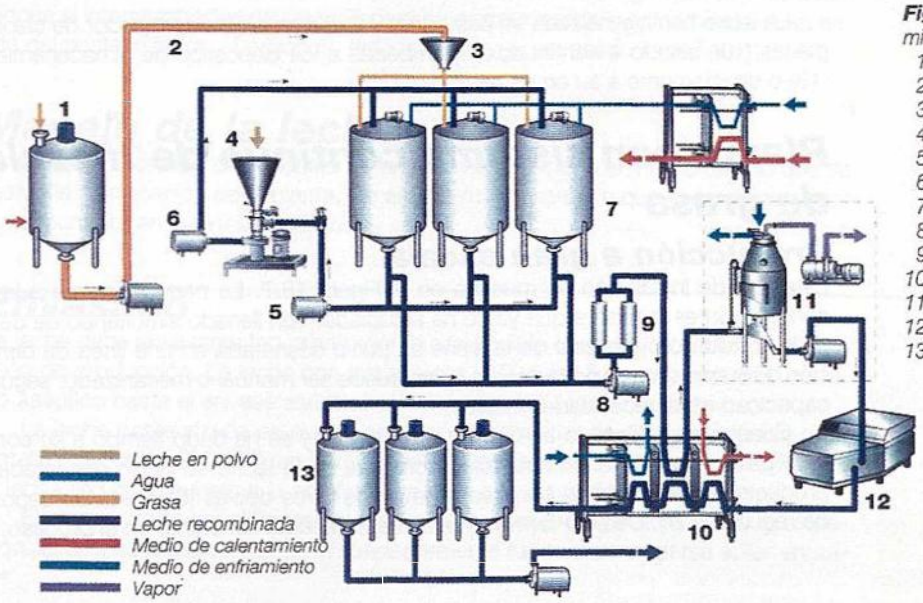


Fig. 18.5 *Planta de recombinación con suministro de grasa a los tanques de mezcla.*
1. Tanque para grasa
2. Tubería aislada para grasa
3. Tolva de pesado de grasa
4. Tolva con mezclador de alta velocidad
5. Bomba de recirculación
6. Bomba de refuerzo
7. Tanque de mezcla
8. Bomba de descarga
9. Filtros
10. Intercambiador de calor de placas
11. Desaireador a vacío, opcional
12. Homogeneizador
13. Tanques de almacenamiento

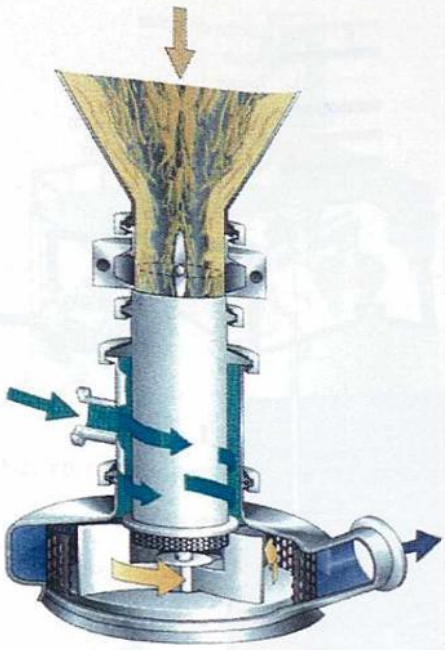


Fig. 18.6 *Mezclador de alta velocidad para mezclado de agua y leche en polvo.*

leche en polvo desnatada se disuelve más fácilmente en agua caliente que en agua fría.

La bomba de circulación (5) se arranca cuando el tanque está medio lleno, y el agua fluye a través de una línea de derivación desde el tanque de mezcla hasta un sistema de mezclado a alta velocidad (4).

En el mezclador de alta velocidad, que se muestra en la Figura 18.6, los ingredientes secos se dispersan a través de una tolva a razón de 45 kg/min. Se crea un vacío por acción conjunta de la bomba de circulación (5) y la bomba de refuerzo (6) que provoca que el mezclador absorba los ingredientes en la boca del impeller.

Un tubo difusor mantiene separados el líquido y los materiales secos hasta que alcanzan la boca del impeller. Una válvula de mariposa accionada manualmente o remotamente sella la entrada de la tolva una vez que el último de los ingredientes secos entra en la cámara de mezclado.

El agitador del tanque de mezcla se pone en marcha a la misma vez que la bomba de circulación. El agua continúa entrando en el depósito mientras se realiza la mezcla, hasta que se llega a la cantidad especificada.

Cuando todo el polvo ha sido añadido, el agitador y el circuito de circulación se paran y el contenido del depósito se deja reposar para dar tiempo a que la leche desnatada en polvo se disuelva completamente. Si se tiene una temperatura del agua de 35-45ºC este proceso durará unos 20 minutos. Al final de este periodo el agitador se vuelve a poner en marcha. Mientras tanto el mezclador se conecta al siguiente lote que se va a recombinar.

A continuación se añade grasa láctea anhidra procedente de los depósitos de almacenamiento de grasa (1). La cantidad adecuada se mide en una tolva de pesado (3). El agitador, diseñado especialmente para conseguir una óptima dispersión de la grasa, se vuelve a poner en marcha y funciona durante varios minutos dispersando finamente la grasa en la leche desnatada.

Las tuberías de transporte de la fracción grasa caliente se aislan normalmente para prevenir que la temperatura de la grasa caiga por debajo del punto de fusión.

Cuando todos los ingredientes han sido mezclados y añadidos a un tanque, el proceso se repite en el depósito siguiente.

La mezcla de leche desnatada y grasa se saca de forma continua del depósito de mezcla mediante una bomba (8), que la envía a los filtros dobles (9), donde cualquier partícula extraña como hilos o partes del saco de envasado son retenidas. Después de un precalentamiento en un intercambiador de calor (10), el producto se bombea al homogeneizador (12), donde se completa la dispersión de los glóbulos grasos.

Durante la operación de mezcla del polvo, el producto puede incorporar grandes volúmenes de aire, que pueden provocar que se queme el producto en el pasteurizador y problemas durante la homogeneización. Un depósito desaireador a vacío (11) puede instalarse en la línea antes del homogeneizador para eliminar este aire. El producto se precalienta a 7-8ºC por encima de la temperatura de homogeneización, antes de su entrada en el desaireador, donde se ajusta el vacío de forma que el producto que sale tenga la temperatura correcta de homogeneización, normalmente de 65ºC.

La leche homogeneizada se pasteuriza y enfría en el intercambiador de calor de placas (10), siendo a continuación bombeada a los depósitos de almacenamiento (13) o directamente a su envasado.

Planta con sistema continuo de mezcla de grasa

Producción a gran escala

Este tipo de instalación se muestra en la Figura 18.7. La parte referente a la reconstitución es la misma que ya se ha estudiado, con llenado simultáneo de depósitos en rotación y mezcla de la leche en polvo desnatada en una línea de derivación. El suministro del producto en polvo puede ser manual o mecanizado, según la capacidad y las necesidades locales.

Cuando se ha llenado un depósito de mezcla y se ha dado tiempo a su contenido para conseguir una hidratación completa de la leche en polvo desnatada, el producto reconstituido se bombea a través de filtros dobles (6), hasta un deposito de regulación (7). De esta forma se asegura un caudal constante en el proceso.

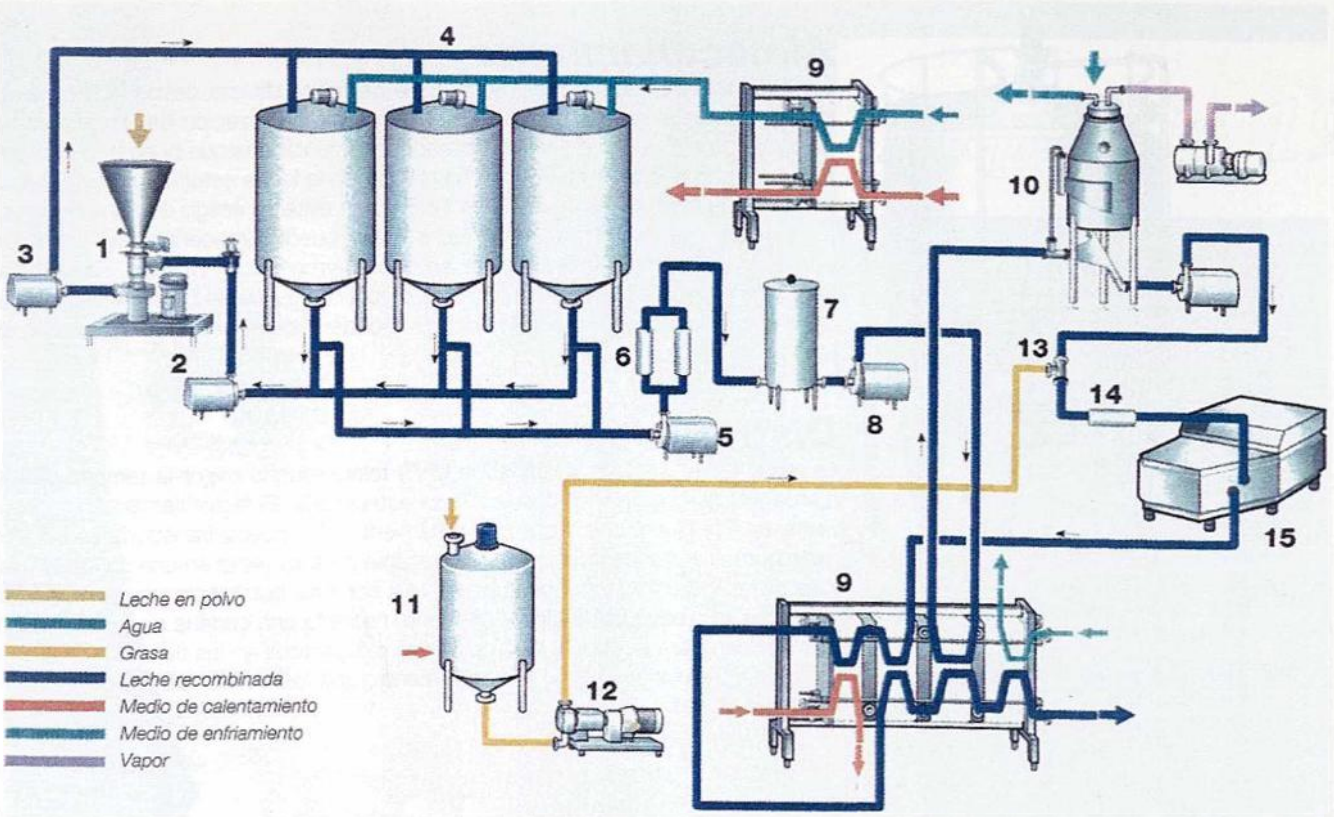


Fig. 18.7 *Planta de recombinación con mezclado de grasa en línea.*
1.Tolva con mezclador de alta velocidad
2. Bomba de circulación
3. Bomba de refuerzo
4. Tanques de mezcla
5. Bomba de descarga
6. Filtros
7. Tanque de pulmón
8. Bomba de alimentación
9. Intercambiador de calor de placas
10. Desaireador a vacío
11. Tanque de grasa
12. Bomba de desplazamiento positivo
13. Inyector de grasa
14. Mezclador en línea
15. Homogeneizador

Por medio de una bomba centrífuga (8) se envía la leche desnatada a través de una sección de precalentamiento de un intercambiador de calor de placas (9). En la línea que se muestra en la Figura 18.5, la grasa se añadía en los depósitos de mezcla. La grasa elimina la espuma, y limita la formación de ésta como consecuencia de la incorporación de aire. Sin embargo, en este caso se produce una formación fuerte de espuma, por lo que es conveniente instalar un depósito de desaireación a vacío (10), situado en la línea después de la sección de precalentamiento del intercambiador de calor de placas (9). La leche se precalienta hasta unos 8°C por encima de la temperatura de homogeneización, después de lo cual se procede a su desaireación como ya se ha indicado anteriormente. La leche pasa entonces a través de un inyector (13), donde la grasa líquida procedente de los depósitos de fundido (11) se dosifica de manera continua en el flujo de la tubería por medio de una bomba dosificadora de desplazamiento positivo (12). La mezcla se completa gracias a un mezclador (14), que trabaja en continuo en la línea, una vez pasado el inyector.

Inmediatamente después de efectuada la mezcla, la leche recombinada pasa a un homogeneizador de alta capacidad (15), donde la grasa se rompe dando lugar a finos glóbulos, repartidos de forma uniforme. La leche homogeneizada vuelve entonces al intercambiador de calor (9) para su pasteurización y enfriamiento. A su salida del pasteurizador, el producto está listo para su envasado inmediato.

Manejo de la leche

Es necesario considerar el manejo de la leche recombinada al mismo tiempo que se realiza la planificación de la planta. De esta forma se asegura que el producto llegue al consumidor en buenas condiciones.

Envasado

La leche debe envasarse tan pronto como sea posible después de finalizado el proceso de producción. La leche con tratamiento UHT debe fluir por un sistema cerrado aséptico hasta el envase aséptico o la máquina de llenado de latas.

La leche pasteurizada se puede envasar en paquetes de cartón o plástico o en botellas de cristal. Si se utilizan botellas deben ser de cristal oscuro, lo que evita que la leche se vea expuesta a la acción de la luz y que su gusto se estropee.

El envase debe ser siempre estanco al aire, para proteger la leche de la oxidación. El envase debe ser también suficientemente fuerte para poderse apilar en cajas.

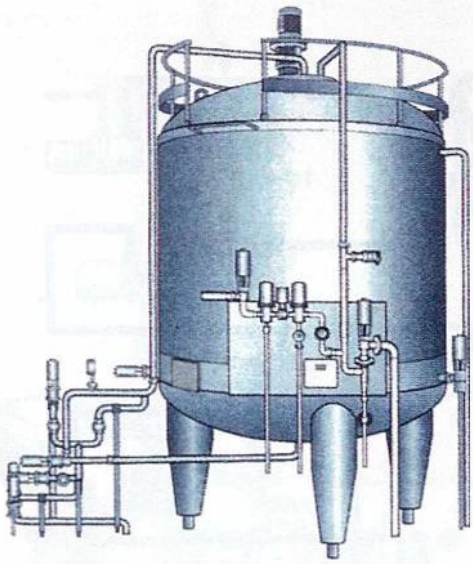


Fig. 18.8 *Un tanque aséptico elimina el riesgo de reinfección.*

Almacenamiento

La leche recombinada normalmente fluye de forma directa desde la linea de producción hasta el envasado. Puede ser necesaria la utilización de un depósito pulmón con objeto de compensar las paradas momentáneas que puedan ocurrir en las líneas de producción o envasado. En el caso de la leche esterilizada, este depósito debe ser de diseño aséptico (Figura 18.8), para evitar el riesgo de reinfecciones.

Una vez que está envasada la leche estéril puede almacenarse en condiciones cualesquiera, siempre y cuando los envases permanezcan intactos. La leche pasteurizada debe conservarse en cámaras frigoríficas. La leche UHT y la leche esterilizada se prefiere en los mercados donde la cadena de frío es incompleta o no existe.

Distribución

La leche estéril (incluyendo la leche UHT) tolera mucho mejor la temperatura ambiente y otras condiciones que la leche pasteurizada. El factor tiempo no es tan importante. Por ejemplo, la leche con tratamiento UHT puede transportarse en un camión normal a grandes distancias y colocarse para su venta en una tienda sin sistemas de refrigeración, y donde la gente va a comprar quizá sólo una vez a la semana. La leche pasteurizada, por el contrario, necesita una cadena de frío, con camiones aislados para su distribución, armarios refrigerados en las tiendas, que se realice la compra diariamente y, preferiblemente, que los consumidores dispongan de frigorífico en casa.

Capítulo 19

Helados

No se sabe con certeza cuándo empezaron a producirse los helados, pero probablemente tienen su origen en China. A partir de escritos muy antiguos se ha conocido que a los chinos les gustaba un producto congelado hecho como una mezcla de zumos de fruta y nieve, que actualmente nosotros llamamos helados de agua. Esta técnica que se extendió más tarde a la antigua Grecia y Roma, era de uso exclusivo de poderosos, en particular de aquellos que eran aficionados a los postres congelados.

Después de desaparecer durante siglos, los helados de crema reaparecieron en Italia, según distintas formas, en la Edad Media, muy probablemente como resultado del regreso de Marco Polo a Italia en 1295, después de unos 16-17 años de estancia en China, donde aprendió a apreciar los postres congelados a base de leche. Desde Italia, los helados se extendieron por Europa durante el siglo XVII, donde permaneció durante mucho tiempo como un producto de lujo reservado practicamente sólo para las cortes reales.

La venta de helados al público en general comenzó en Estados Unidos en el siglo XVIII, pero no se extendió ampliamente su consumo hasta el siglo XIX, que fué cuando apareció en el mercado la primera empresa de venta al por mayor.

Categorías de helados

Los helados pueden dividirse en cuatro categorías principales, de acuerdo con los ingredientes utilizados:

- helados de crema hechos exclusivamente a partir de productos lácteos,
- helados de crema que contienen grasas de origen vegetal,
- sorbetes hechos con zumos de frutas, grasa láctea y sólidos grasos no lácteos,
- helados o sorbetes de agua, hechos con agua, azúcar y concentrados de frutas.

En la actualidad, los dos primeros tipos de helados suponen el 80-90% de la producción total mundial. Las descripciones que se dan a continuación se refieren exclusivamente a estos dos tipos. Las fórmulas típicas de los helados de crema se muestran en la Tabla 19.1.

Tabla 19.1
Fórmulas típicas de los helados de crema.

Tipo de helado	Grasa %p/p	SLNG %p/p	Azúcar %p/p	E/E %p/p	Agua %p/p	Overrun v/v
Postre helado	15	10	15	0.3	59.7	110
Helado de crema	10	11	14	0.4	64.6	100
Leche helada	4	12	13	0.6	70.4	85
Sorbete	2	4	22	0.4	71.6	50
Helado de agua	0	0	22	0.2	77.8	0

Grasa:	Leche, nata, mantequilla o grasa vegetal
Agua:	Puede incluir sustancias colorantes y aromas
SLNG:	Sólidos lácteos no grasos (proteínas, sales, lactosa)
Azúcar:	Sacarosa sólida o líquida (el 10% del azúcar puede ser glucosa o edulcorantes no azucarados)
E/E:	Emulsionantes y estabilizantes, ej. monoglicéridos, gelatina, alginatos
Overrum:	Cantidad de aire en el producto
Otros ingredientes:	Durante la fabricación se pueden añadir huevos, frutas y trocitos de chocolate

El proceso de fabricación de helados de crema

El proceso de elaboración de los helados de crema consta básicamente de los pasos que se muestran en la Figura 19.1.

Recepción y almacenamiento de las materias primas

Las materias primas se almacenan en tanques, silos, bidones o sacos dependiendo de su forma física. La solución de las instalaciones de recepción depende de la capacidad de la planta.

Los productos sólidos, que se suelen utilizar en cantidades relativamente pequeñas, tales como suero en polvo, estabilizantes y emulsionantes, cacao en polvo, etc., se reciben generalmente en sacos. El azúcar y la leche en polvo se pueden entregar en contenedores y por medio de sistemas de transporte neumáticos pasan a los silos de almacenamiento. En la actualidad, es cada vez más corriente recibir los productos sólidos tales como el azúcar y la leche en polvo en sacos, que se vacían por medio de equipos especiales.

Los productos líquidos tales como la leche, nata, leche concentrada, glucosa líquida y grasas vegetales se entregan en cisternas. Los productos lácteos recibidos se enfrían hasta unos 5°C antes de su almacenamiento, mientras que la leche con-

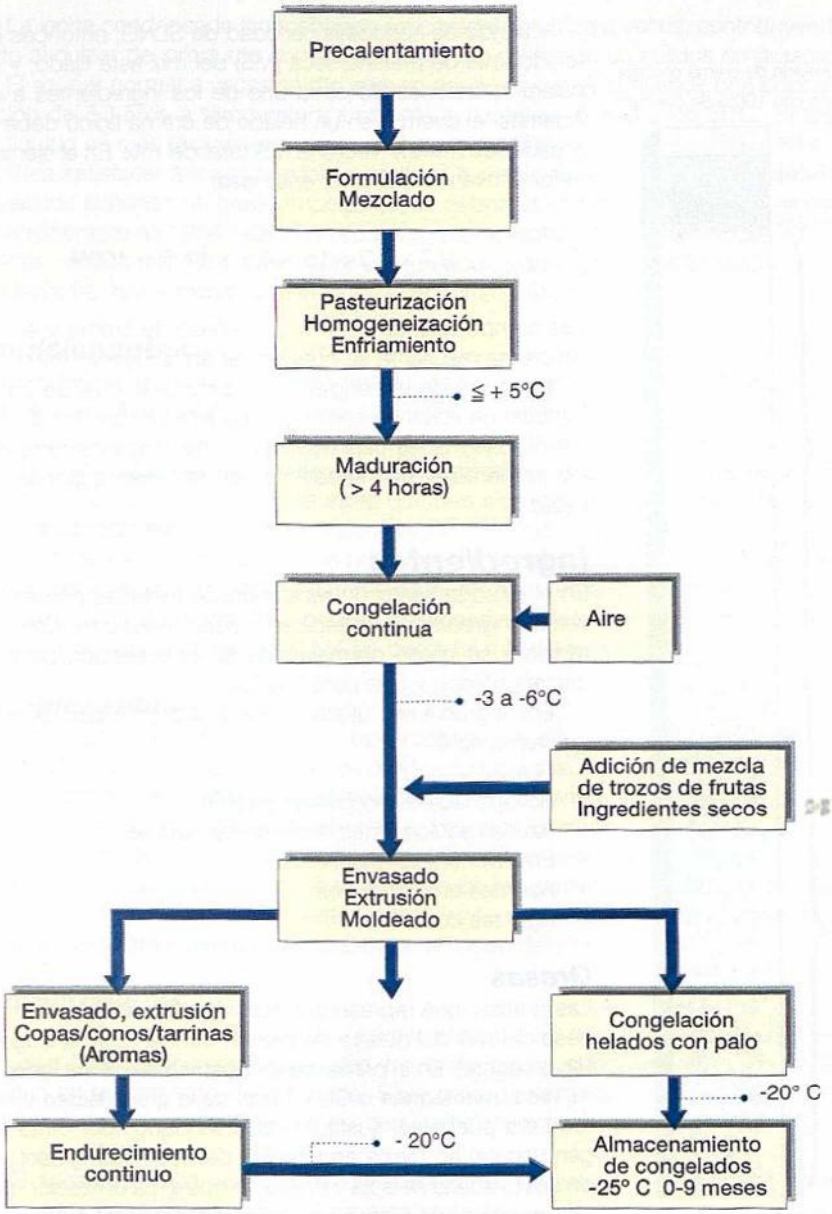


Fig. 19.1 *Proceso de fabricación de helados.*

densada, la glucosa y las grasas vegetales se almacenan a temperaturas relativamente altas (30-50°C), con objeto de mantener su viscosidad lo suficientemente baja como para que puedan ser bombeadas. La grasa láctea se entrega en la forma de grasa láctea anhidra, o en bloques de mantequilla que son fundidos y bombeados a los depósitos de almacenamiento, donde se debe mantener una temperatura de 35-40°C. En este último caso, se preparan lotes para uno o dos días de producción para evitar la oxidación de la grasa de la leche, a menos que se almacenen bajo atmósfera de gas inerte (nitrógeno).

Formulación

El peso y/o el volumen de cada uno de los ingredientes se debe determinar cuidadosamente antes de realizar su mezcla. Para obtener un mix (una mezcla) bien equilibrado es esencial calcular el porcentaje de sólidos lácteos no grasos (SLNG) a utilizar. Esto se hace restando de 100 el porcentaje de grasas, emulsionantes y estabilizantes (E/E) que se quiera utilizar, y multiplicando lo que quede por 0.15.

Por ejemplo, para producir un helado de crema con un 10% en peso de grasa, 15% en peso de azúcar y 0.5% en peso de E/E, el porcentaje en peso de SLNG que se necesita vendrá dado por el siguiente cálculo:

$$(100 - 10 - 15 - 0.5) \times 0.15 = 11.5\% \text{ en peso SLNG}$$

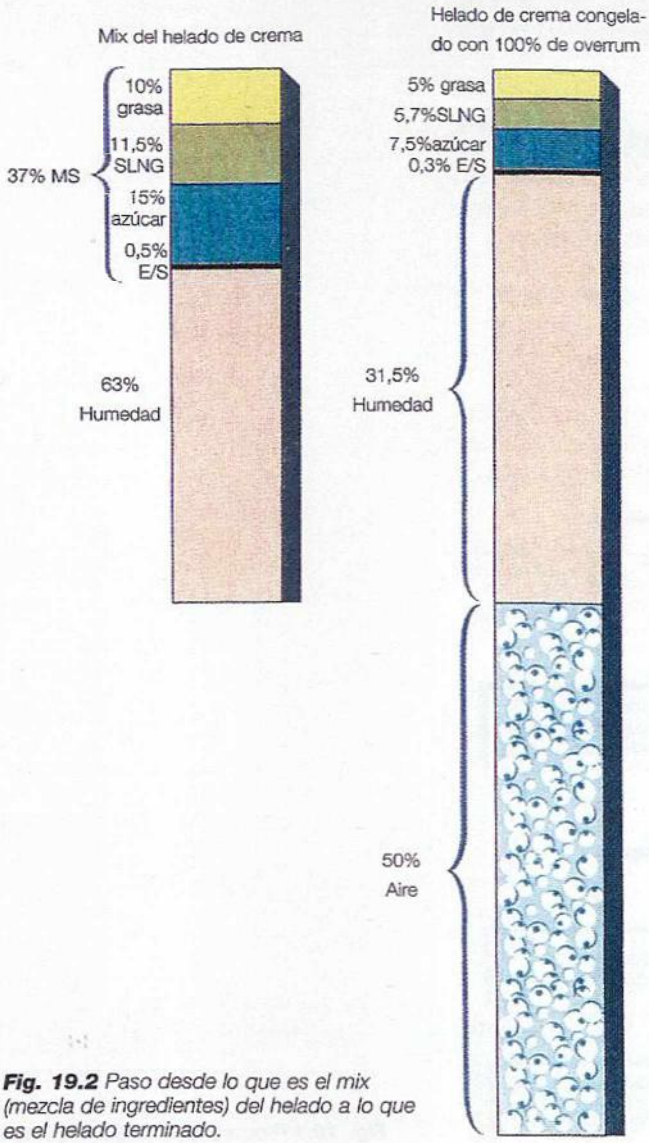


Fig. 19.2 *Paso desde lo que es el mix (mezcla de ingredientes) del helado a lo que es el helado terminado.*

Cuando se conoce la cantidad de SLNG, entonces el contenido total de materia seca (MS) del mix está fijado, y se calculará la cantidad de cada uno de los ingredientes a utilizar. Además, el overrun en un helado de crema típico debe ser alrededor de 2.5-2.7 veces la MS total del mix. En el ejemplo anterior el overrun debe ser entonces:

$$2.7 \times (10 + 15 + 0.5 + 11.5) = 100\%$$

Las composiciones del mix del helado de crema y el helado de crema resultante se pueden ver en la Figura 19.2.

Después de la congelación, durante la cual se introduce también un volumen controlado de aire por batido, el volumen del mix original es casi doblado, lo que significa también que los porcentajes de ingredientes en volumen suponen casi la mitad.

Ingredientes

En el departamento de recepción de materias primas los diversos ingredientes se reciben, pesan y analizan. Este departamento se divide normalmente en una sección para ingredientes sólidos y otra para líquidos.

Los ingredientes utilizados para la producción de helados de crema son:

- Grasa
- Sólidos lácteos no grasos (SLNG)
- Azúcar/edulcorantes distintos del azúcar
- Emulsionantes/estabilizantes
- Agentes aromatizantes
- Agentes colorantes

Grasas

Las grasas, que representan aproximadamente el 10-15% en peso del mix del helado de crema, pueden ser de origen lácteo o vegetal. En el primer caso, puede tratarse de leche entera, nata, mantequilla o GLA. Parte de la grasa láctea o incluso toda ella puede ser sustituida en los helados por otras de origen vegetal en forma endurecida de aceite de girasol, aceite de coco, aceite de soja y aceite de colza. La utilización de grasas vegetales da lugar a una ligera diferencia en color y sabor, si se compara con las grasas lácteas. La diferencia no se nota apenas si se añaden agentes colorantes y aromatizantes. La utilización de grasas vegetales en la elaboración de helados está prohibida en algunos países.

Sólidos lácteos no grasos (SLNG)

Los sólidos lácteos no grasos consisten en proteínas, lactosa y sales minerales. Se añaden en forma de leche en polvo y de leche desnatada concentrada. Para obtener los mejores resultados, la cantidad de sólidos no grasos debe guardar siempre una cierta proporción con la de grasa. La cantidad de sólidos no grasos debe ser un 11-11.5% en peso para la fabricación del mix de helados de crema con un contenido en grasa del 10-12%.

Los sólidos no grasos tienen no sólo un alto valor nutritivo, sino que además tienen la capacidad de mejorar la textura del helado al ligar y reemplazar el agua. El componente protéico de los SLNG también influye de manera significativa sobre la correcta distribución del aire en el helado durante el proceso de congelación.

Azúcares

Se añaden azúcares al helado con objeto de ajustar el contenido de sólidos en el mismo y dar el dulzor típico que demandan los consumidores. El mix del helado contiene normalmente entre un 10 y un 18% en peso de azúcar. Son muchos los factores que afectan al poder edulcorante y a la calidad del producto, pudiéndose utilizar distintos tipos de azúcares, tales como los azúcares de caña o remolacha, glucosa, lactosa y azúcar invertida (que es una mezcla de glucosa y fructosa).

La leche condensada (concentrada azucarada) se utiliza a veces, contribuyendo tanto al dulzor del producto como a aumentar su contenido en sólidos no grasos.

El azúcar normal a veces se disuelve en agua; se puede conseguir una concentración del 50-55% a temperatura ambiente, y hasta del 70% a unos 80°C. El azúcar líquido es más fácil de manejar que el azúcar sólido.

Para satisfacer a los que están sometidos a dietas especiales, entre los que los diabéticos suponen un grupo importante, se deben utilizar productos edulcorantes. Un edulcorante no tiene valor nutritivo pero tiene un sabor muy dulce incluso en pequeñas cantidades. Hay que resaltar que un edulcorante no se puede utilizar como conservante, por ejemplo para la leche concentrada azucarada.

Emulsionantes

Los emulsionantes son sustancias que ayudan a conseguir una adecuada estabilidad de la emulsión (el producto) por reducción de la tensión superficial entre las fases líquidas. Un emulsionante muy conocido es la yema de huevo, pero es caro y menos efectivo que los tipos más corrientes utilizados, que son principalmente derivados no iónicos de grasas naturales que han sido esterificadas para dotarlas de uno o más radicales solubles en agua (hidrófilos), y uno o más radicales solubles en grasa (lipófilos). Los emulsionantes utilizados en la elaboración de helados pueden ser divididos en cuatro grupos: ésteres de la glicerina, ésteres del sorbitol, ésteres de azúcares y ésteres de otros orígenes. La cantidad de emulsionante que normalmente se añade es de un 0.3-0.5% en peso del mix del helado.

Estabilizantes

Un estabilizante es una sustancia que, cuando se dispersa en una fase líquida (agua), absorbe una gran cantidad de moléculas de agua. A este fenómeno se le llama hidratación y significa que el estabilizante forma un entramado que evita que las moléculas de agua se muevan libremente. Hay dos tipos de estabilizantes: proteicos y carbohidratos. El grupo de los proteicos incluye sustancias tales como la gelatina, caseina, albúmina y globulina. El grupo de los carbohidratos incluye coloides marinos, hemicelulosa y compuestos modificados de la celulosa. La dosis de estabilizantes es normalmente de un 0.2-0.4% en peso del mix del helado.

Aromatizantes

Estos aditivos son muy importantes para la elección del helado por parte del cliente. Los más utilizados son los sabores de vainilla, turrón, chocolate, fresa y nuez. Se añaden en el momento de la mezcla. Si se trata de partículas grandes tales como nueces, frutas o mermeladas, se añaden cuando la mezcla o mix ha sido congelada.

Los sabores más comunes de los helados son vainilla, almendra, chocolate, fresa y nuez.

El cacao se utiliza mucho para dar a las barras de helado, conos y bloques de helado una capa de chocolate. Para este propósito, el cacao se mezcla con grasa (por ejemplo, grasa de cacao), con objeto de dar a esa capa de chocolate la viscosidad, elasticidad y consistencia adecuadas.

Colorantes

Los agentes colorantes se añaden al mix para dar al helado una apariencia atractiva y mejorar el color de las frutas añadidas. Los colorantes se suelen añadir en forma de concentrado. Sólo se deben utilizar colorantes permitidos por la legislación.

Pesado, dosificación y mezcla

En general, todos los ingredientes sólidos son pesados, mientras que los líquidos pueden ser pesados o dosificados mediante medidores volumétricos.

En las plantas con pequeña capacidad de trabajo y pequeños volúmenes totales, los ingredientes sólidos normalmente se pesan y se vacían a mano en el tanque de mezcla. Estos tanques están diseñados para realizar un calentamiento indirecto y van equipados con eficientes agitadores.

Los fabricantes a gran escala utilizan sistemas automáticos de preparación de lotes, que a menudo se construyen según las especificaciones del usuario.

Las materias primas una vez en el tanque se calientan y se mezclan hasta conseguir un mix homogéneo, que a continuación se pasteuriza y se homogeneiza.

En las plantas de proceso a gran escala es común tener dos tanques de preparación del mix con un volumen que se corresponde con la capacidad horaria del pasteurizador, con el fin de mantener un flujo continuo. Los ingredientes sólidos, especialmente la leche en polvo, son normalmente añadidos a una unidad de mezcla a través de la cual se hace pasar agua creando un efecto de eyector que absorbe

el polvo en la corriente. Antes de retornar al tanque el mix normalmente se calienta hasta 50-60°C para facilitar la disolución. Los ingredientes líquidos tales como la leche, la nata, el azúcar líquido, etc. se miden en el tanque de mezcla.

Homogeneización y pasteurización

En la producción a gran escala el mix pasa a través de un filtro y después a un depósito de regulación, siendo bombeado desde aquí hasta un intercambiador de calor de placas, donde se precalienta a 73-75°C.

La GLA o la grasa vegetal se puede dosificar y mezclar en continuo en una mezcladora en-línea de camino hacia el homogeneizador. Después de la homogeneización a 14-20 MPa (140-200 bar), el mix se pasteuriza.

En la producción por lotes el mix, que incluye una cantidad medida de grasa, es primero pasteurizado en el tanque donde se realiza el mezclado y el procesado, normalmente a 70°C con un tiempo de mantenimiento de 30 minutos. El mix se pasa a continuación a través del homogeneizador, se enfría hasta 5°C en un intercambiador de calor de placas y se transfiere hasta el tanque de maduración.

En las plantas que trabajan a gran escala el mix homogeneizado se retorna a un intercambiador de calor de placas y se pasteuriza a 83-85°C durante unos 15 segundos. El mix pasteurizado se enfría después a 5°C y se transfiere al tanque de maduración.

Maduración

El mix se debe madurar al menos durante 4 horas a una temperatura entre 2 y 5°C con una continua pero suave agitación. La maduración proporciona tiempo para que el estabilizante surta efecto y para que cristalice la grasa.

Congelación continua

El proceso continuo de congelación tiene dos funciones:

- incorporar una cantidad controlada de aire a la mezcla;
- congelar el contenido de agua de la mezcla de forma que se obtenga un gran número de pequeños cristales de hielo.

La Figura 19.3 muestra el exterior y la Figura 19.4 muestra el interior de una unidad congeladora continua (este equipo se denomina en inglés *freezer*). La mezcla se bombea hacia el interior de un cilindro refrigerado por medio de una camisa donde se evapora amoniaco. El proceso de congelación es *muy rápido*; esto es muy importante para la formación de pequeños cristales de hielo. La capa de mix congelado sobre la pared del cilindro es continuamente rascada por medio de una cuchilla rotatoria instalada en el interior del cilindro.

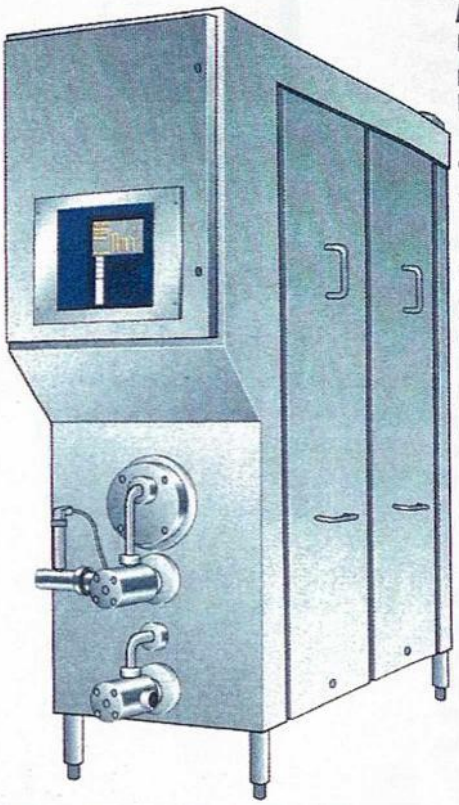


Fig. 19.3 *Congelador continuo (freezer, en inglés) de helado de crema, controlado automáticamente.*

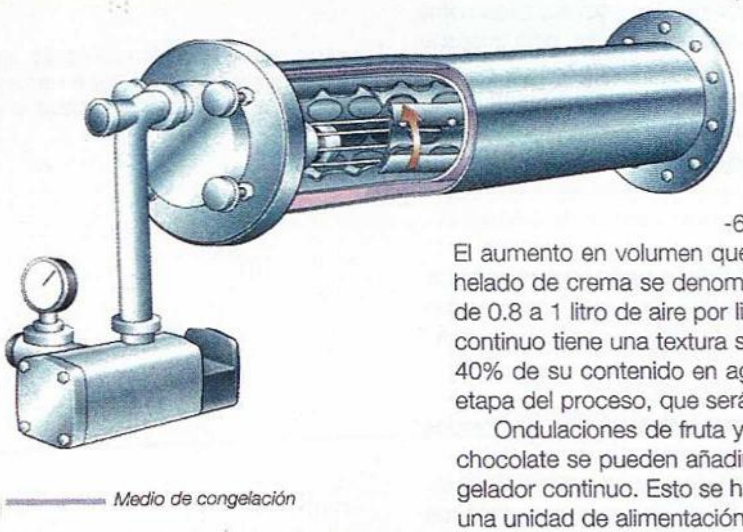


Fig. 19.4 *Principio de trabajo del congelador de helado de crema, controlado manualmente.*

Desde los tanques de maduración el mix pasa al congelador continuo, donde el aire se introduce en la emulsión mientras que el mix se congela entre -3°C y -6°C dependiendo del producto que se esté congelando. El aumento en volumen que se produce por la incorporación de aire en el mix del helado de crema se denomina "overrun" y normalmente es del 80-100%, es decir, de 0.8 a 1 litro de aire por litro de mix. El helado de crema que sale del congelador continuo tiene una textura similar al helado blando, y tiene congelada del orden del 40% de su contenido en agua. Por lo tanto, se puede bombear hasta la siguiente etapa del proceso, que será el envasado, la extrusión o el moldeo.

Ondulaciones de fruta y los ingredientes secos como piezas de fruta, nueces o chocolate se pueden añadir al helado de crema inmediatamente después del congelador continuo. Esto se hace conectando una bomba de aplicación de adornos o una unidad de alimentación de ingredientes a la línea del helado de crema.

Envasado, extrusión y moldeo

Envasado en copas, conos y tarrinas

El helado de crema se envasa en copas, conos y tarrinas (1 a 6 litros) en una máquina llenadora rotatoria o lineal. Estos envases se pueden llenar con distintos sabores, y los productos se pueden decorar con nueces, frutas y chocolate. Los paquetes se tapan antes de dejar la máquina, tras la cual se pasan a través del túnel de endurecimiento donde tiene lugar la congelación a una temperatura de -20°C. Antes o después del endurecimiento los productos pueden embalarse manual o automáticamente en cajas o paquetes.

Los tubos de plástico o cajas de cartón se pueden llenar a mano mediante un dispositivo equipado para suministrar uno o dos sabores.

Extrusión de productos con palo y sin palo

Los productos a base de helados de crema extrusionados se fabrican normalmente sobre un extrusionador de túnel de bandejas. El helado se puede extrusionar directamente sobre bandejas según diferentes formas y tamaños, o en copas o conos, o en un sandwich de barquillo. En la Figura 19.5 se muestra una unidad de extrusión.

Una vez aplicada la decoración, los productos se pasan en bandejas a través de un túnel de endurecimiento donde se congelan a -20°C. Tras el endurecimiento los productos se quitan de las bandejas para pasar a su envoltura y envasado en cajas, manualmente o automáticamente. Este sistema es continuo; dependiendo de la capacidad del extrusionador y del tipo de producto, se pueden producir por hora unas 5-25.000 unidades.

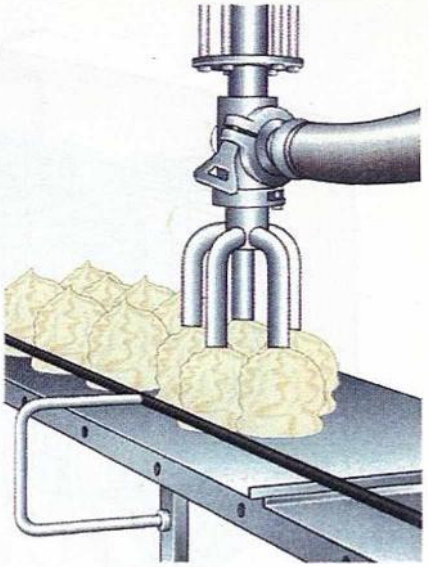


Fig. 19.5 *Extrusionador en un túnel de bandeja.*

Moldeo de barras

Las barras de helado de crema o las barras de helado de agua se hacen en máquinas especiales, también denominadas congeladores de especialidades con palo, con cavidades donde se moldean los helados de crema o de agua. El helado de crema se suministra directamente desde el congelador continuo a una temperatura aproximadamente de -3°C. Los moldes llenos se transportan a continuación sumergidos en una solución salmuera que se mantiene a una temperatura de -40°C, que congela el helado de crema o la solución acuosa (el helado de agua).

Los palos se insertan antes de que los moldes se congelen completamente.

Los productos congelados se sacan de los moldes pasándolos a través de una solución de salmuera caliente que funde las superficies de los productos y permite que se puedan sacar automáticamente por medio de una unidad extractora. Después de la extracción las barras (las especialidades) se pueden bañar en chocolate antes de ser transferidas a la máquina de envoltura. Como los productos están completamente congelados, se pueden llevar directamente a las cámaras de conservación de congelados después de la envoltura y el empaquetado.

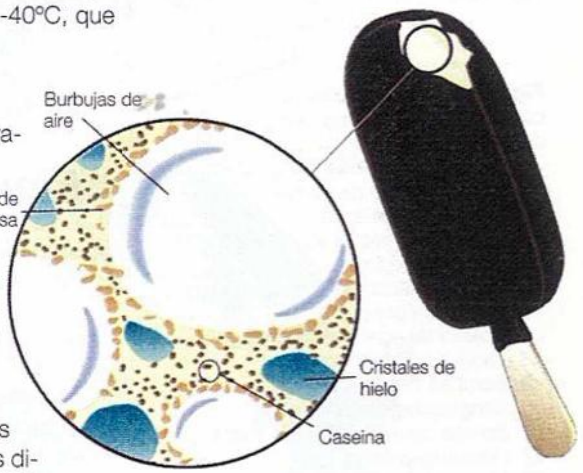


Fig. 19.6 *Textura de un helado con palo.*

Se puede producir toda una variedad de formas en estos congeladores de especialidades con palo así como productos con uno, dos o tres sabores y productos con cubierta exterior y corazón a base de productos diferentes, como un producto con un corazón de helado de crema y una cubierta a base de helado de agua.

La Figura 19.6 muestra un tipo de congelador de especialidades con palo para la fabricación de barras de helado de crema y helado de agua. La vista del corte de una barra de helado de crema de la Figura 19.7 muestra la textura del helado de crema.

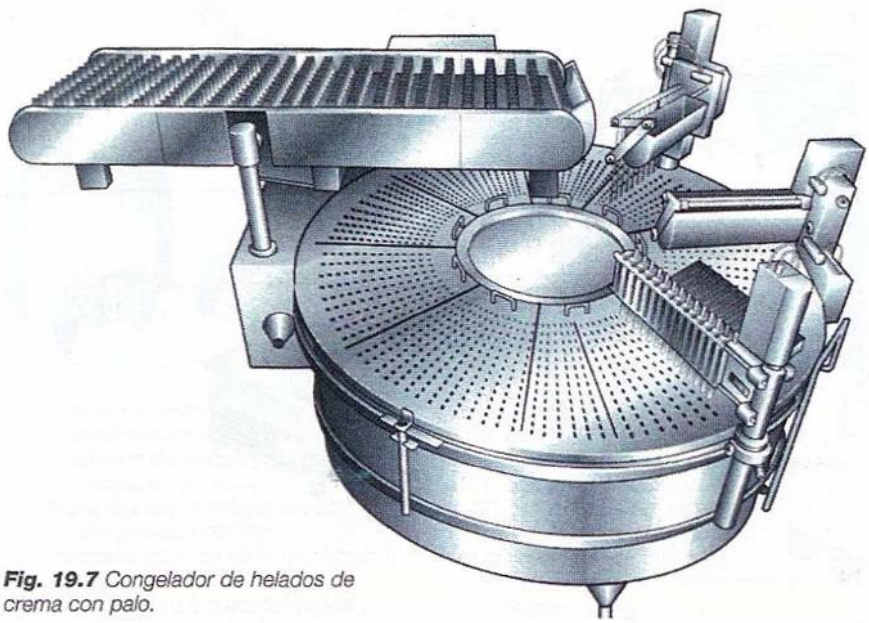


Fig. 19.7 *Congelador de helados de crema con palo.*

Endurecimiento y conservación del helado

La fabricación del helado de crema no está completa hasta que se somete de forma continua a un endurecimiento a una temperatura de -20°C. Para los productos producidos en una linea de extrusión o en un congelador de especialidades con palo, la operación de endurecimiento se incluye en el proceso. Los productos envasados inmediatamente después de la congelación deben sin embargo ser transferidos a un túnel de endurecimiento (Figura 19.8). Cuanto más rápido es el endurecimiento, mejor es la textura. Tras el endurecimiento los productos se pasan a la cámara de conservación de congelados donde se almacenan en estantes o cajones palé a una temperatura de -25°C. La vida útil del helado de crema depende del tipo de producto, el envasado, y el mantenimiento de una temperatura suficientemente baja. El periodo de almacenamiento oscila entre 0 y 9 meses.

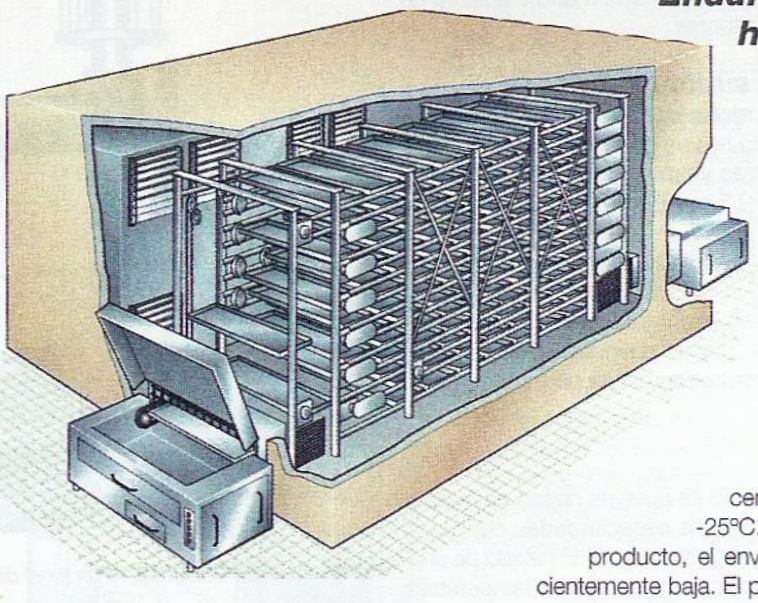


Fig. 19.8 *Túnel de endurecimiento.*

Envoltura y empaquetado

Las copas, las tarrinas, etc. se disponen formando paquetes o se embalan en cajas. Los productos que se consumen cogidos con la mano como los polos, los conos y las barras se envuelven en una máquina envolvedora.

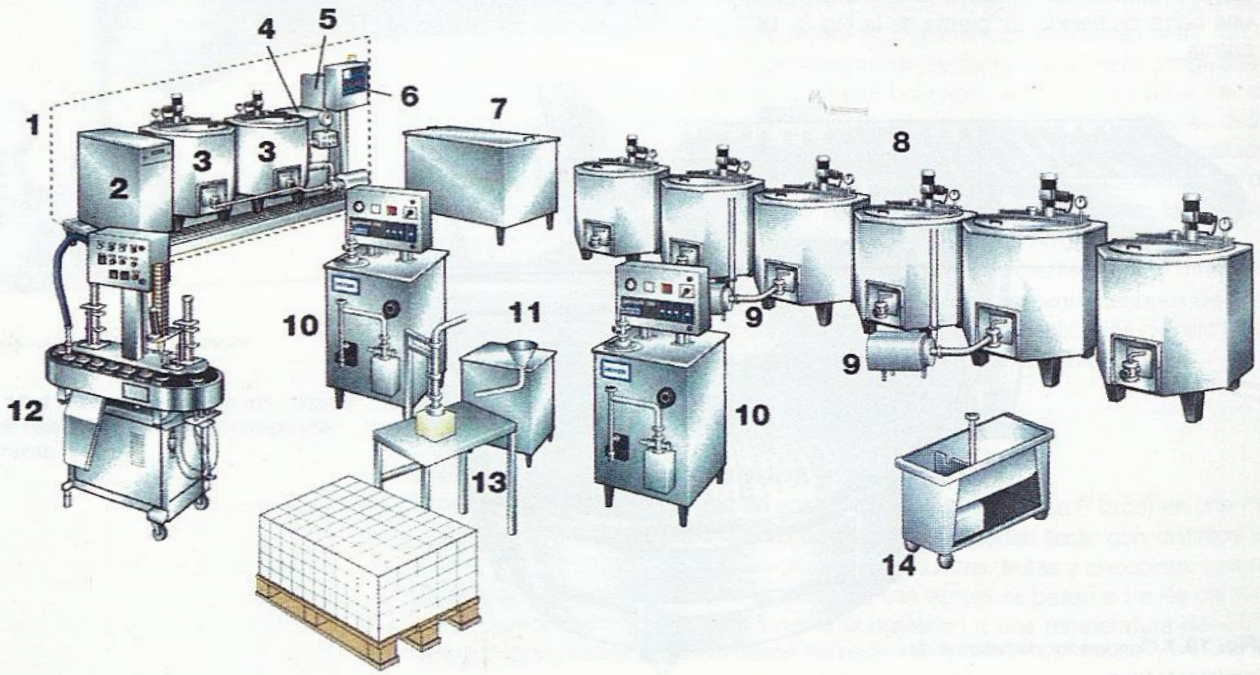
Fig. 19.9 *Planta de producción con una capacidad de 500 litros por hora de helados de crema.*

1. *Módulo que contiene la preparación del mix del helado de crema*
2. *Calentador de agua*
3. *Tanque de mezcla y procesado*
4. *Homogeneizador*
5. *Intercambiador de calor de placas*
6. *Panel de control*
7. *Unidad de enfriamiento de agua*
8. *Tanques de maduración*
9. *Bombas de descarga*
10. *Congeladores continuos*
11. *Bomba para troceado de frutas*
12. *Llenadora rotativa*
13. *Llenadora de tarrinas, manual*
14. *Unidad CIP*

Ejemplos de plantas de producción

A continuación se ilustran dos plantas de producción para dar una idea del flujo de producto en la producción de helados de crema. Una de ellas es una planta relativamente pequeña con una capacidad horaria de 500 litros de helado (Figura 19.9), mientras que la otra (Figura 19.10) es una planta de producción grande, con una capacidad de 5000 - 10000 l/h de distintos tipos de helados de crema.

En la planta pequeña los productos se endurecen normalmente, una vez que son envasados y encartonados, en una cámara que se mantiene a una temperatura de -35 a -40°C. Para acortar el período de endurecimiento tanto como sea posible las cajas se deben de espaciar adecuadamente dentro de cada palé, para que haya una buena distribución del aire frío.



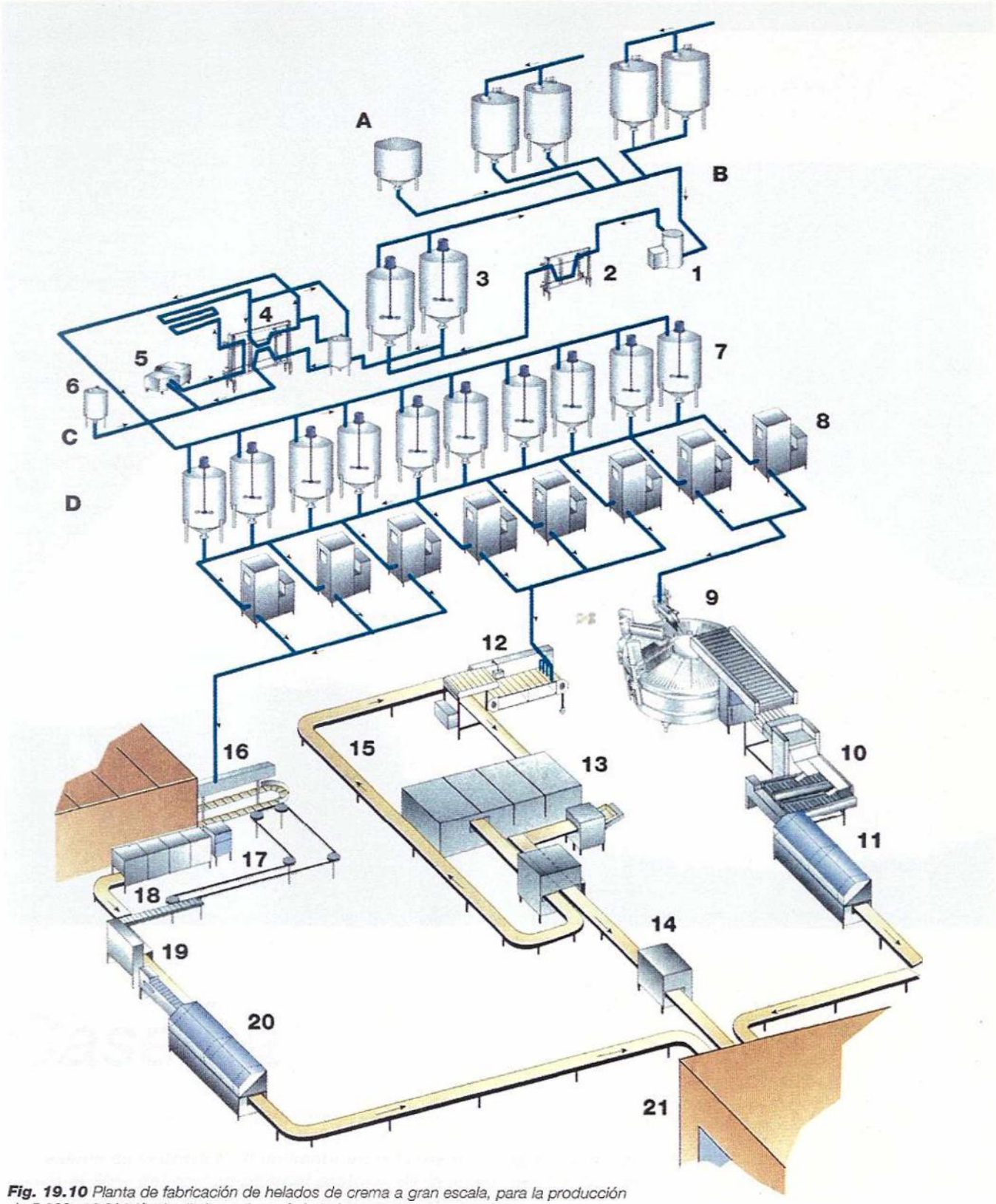


Fig. 19.10 *Planta de fabricación de helados de crema a gran escala, para la producción de 5.000 -10.000 l/h de distintos tipos de helados.*

A. Almacenamiento de materias primas
B. Disolución de ingredientes y mezclado
1. Unidad de mezcla
2. Intercambiador de placas.
3. Depósitos de mezcla (mínimo de dos para procesos continuos)
C. Pasteurización, homogeneización y normalización en grasa del mix
4. Intercambiador de calor de placas
5. Homogeneizador
6. Tanque de GLA o aceite vegetal
D. Planta de producción de helado de crema
7. Tanques de maduración
8. Congeladores continuos
9. Congelador de helados de palo
10. Unidad de envoltura y agrupamiento
11. Unidad de encartonado
12. Llenadora de copas/conos
13. Túnel de endurecimiento
14. Línea de encartonado
15. Transportador de retorno para bandejas vacías
16. Extrusionador de túnel y bandeja
17. Unidad de recubrimiento con chocolate
18. Túnel de enfriamiento
19. Unidad de envoltura
20. Unidad de encartonado
21. Cámara de conservación de congelados

Capítulo 20

Caseina

La caseina es la proteina dominante en la leche de la vaca, constituyendo el 80% del contenido total proteico de la leche. El otro 20% lo constituyen las seroproteinas o proteinas del lactosuero.

La caseina es el componente básico del queso ordinario. Durante el proceso de elaboración de quesos la caseina precipita por la acción enzimática del cuajo, formándose un coágulo de caseina, seroproteinas, grasa, lactosa y las sales minerales de la leche.

La caseina comercial se obtiene a partir de leche desnatada por medio de uno de los dos métodos generales de precipitación por ácido o coagulación mediante el cuajo. En este proceso de separación es necesario eliminar, en la medida de lo posible y mediante lavados en varias etapas con agua, la grasa, las seroproteinas, las sales y la lactosa de la leche, ya que dichas sustancias reducen la calidad de la ca-

seina y el mantenimiento de la misma. La caseina seca y adecuadamente obtenida se conserva relativamente bien y se utiliza principalmente en la elaboración de alimentos y en las industrias químicas.

Diferentes tipos de caseina

La caseina se divide normalmente en los siguientes tipos:

- caseina al cuajo, obtenida por precipitación enzimática de la leche por el citado cuajo;
- caseina ácida, obtenida por acidificación de la leche desnatada hasta el punto isoeléctrico (pH 4.6-4.7).

Además de estos dos tipos principales existen otros tipos comerciales de productos de caseina de importancia:

- co-precipitado de caseina, que se obtiene mediante calentamiento de la leche desnatada hasta una temperatura elevada y a continuación se precipita el complejo caseina/seroproteinas, cosa que se realiza normalmente mediante cloruro cálcico. El co-precipitado también contiene seroproteinas y calcio.
- caseinatos, normalmente caseinato sódico, obtenidos a partir de caseina ácida disuelta en hidróxido sódico.

Influencia de la materia prima

Con el fin de producir una caseina de elevada calidad, la materia prima, la leche desnatada, debe ser de buena calidad. Si han tenido tiempo de actuar las bacterias sobre las proteinas de la leche provocando un cambio de la acidez, esto afectará el color y la consistencia de la caseina, que adquirirá un color grisáceo y una consistencia más suave. Un calentamiento excesivo de la leche antes de la precipitación no sólo causará distintas interacciones entre la lactosa, la caseina y las seroproteinas de la leche, sino que también conferirá a la caseina un color amarillo o en el peor de los casos un color castaño.

Con el fin de producir una caseina de buena calidad bacteriológica, sin un intenso tratamiento térmico de la leche desnatada, la planta de pasteurización debe ir provista también de una planta de microfiltración (MF). Para satisfacer la demanda de buena calidad en la caseina que se destinará a la industria alimentaria, no sólo se ha de diseñar adecuadamente la planta de proceso desde la recepción de la leche, sino que también se ha de controlar cuidadosamente el tratamiento y el manejo de la materia prima antes de la etapa de recepción en la planta de proceso.

Caseina al cuajo

Al igual que en la obtención de los otros tipos de caseina, se utiliza leche desnatada pasteurizada, normalmente a 72°C durante 15-20 segundos. Pequeñas cantidades de grasa son perjudiciales para la calidad de este producto. Es por ello importante que la leche haya sido desnatada de forma eficiente.

La Figura 20.1 muestra las diferentes etapas de la producción de caseina con cuajo. La coagulación se desarrolla gracias a la ayuda de la enzima quimosina presente en el cuajo. La leche se calienta durante un corto período de tiempo y se enfria posteriormente a unos 30°C. Entonces se procede a la adición del cuajo. Después de unos 15-20 minutos se forma un gel, que se corta y se calienta, al mismo tiempo que se procede a su agitación a unos 60°C. Se necesita esta temperatura tan alta para inactivar las enzimas. El tiempo de calentamiento es de unos 30 minutos aproximadamente.

Lavado discontinuo

El suero se drena cuando se ha alcanzado la temperatura final, y la caseína que queda en el envase se lava con agua con objeto de eliminar las seroproteinas, la lactosa y las sales minerales. El lavado se realiza en dos o tres etapas a una temperatura comprendida entre 45 y 60°C.

Después de drenar el agua, la caseina se deshidrata aún más en tamices o centrifugas separadoras. A continuación se seca con aire caliente hasta que el contenido de humedad sea del 12%, y después se reduce a polvo en molinos. La temperatura de secado depende del método utilizado. En un proceso de secado en dos etapas, la temperatura es de 50-55°C en la primera etapa, y de unos 65°C en la segunda.

La caseina al cuajo debe ser blanca o ligeramente amarillenta. Un color más oscuro es un signo de calidad inferior que puede ser causado por un contenido demasiado alto de lactosa.

Lavado continuo

La producción de caseina al cuajo se realizaba originalmente por cargas (en proceso discontinuo), en depósitos especiales de caseina, pero actualmente se utilizan también sistemas continuos. En las plantas continuas, el drenaje del suero se realiza antes de que la caseina pase a través de los dos o tres tanques de lavado provistos de agitadores. El desuerado se realiza normalmente en una decantadora centrífuga para reducir el consumo de agua de lavado. La caseina se separa del agua entre etapas de lavado, en escurridores estáticos inclinados o en decantadoras. Después de terminados todas las etapas de lavado, la mezcla agua/caseina se lleva a otra decantadora para separar toda el agua que sea posible antes del secado final.

En los sistemas de producción a gran escala, la coagulación de la caseina se realiza aún por cargas (de manera discontinua) utilizando un número calculado de depósitos de caseina que se vacían de manera secuencial para alimentar de manera continua la planta de desuerado y lavado.

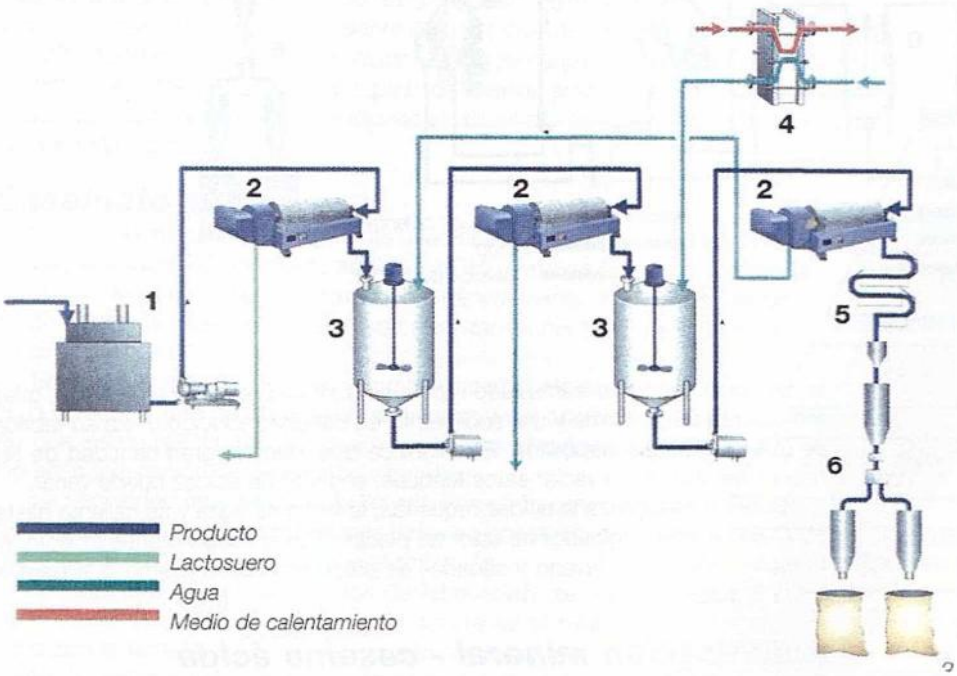


Fig. 20.1 *Línea de proceso con lavado a contracorriente de caseina al cuajo.*
1. Tina para la producción de caseina
2. Decantadora
3. Tanque de lavado
4. Calentador
5. Secado
6. Molienda, cernido y ensacado

El lavado tiene lugar en contracorriente, que utiliza mucha menos agua que el lavado con circulación en paralelo (en el mismo sentido). Este último sistema utiliza un litro de agua por litro de leche desnatada, mientras que el lavado a contracorriente necesita tan sólo unos 0.3-0.4 litros de agua por litro de leche desnatada. El número de etapas de lavado depende de las especificaciones del producto. El agua fresca sólo se aplica en la última etapa. Tras el lavado, la caseina se separa del agua en una decantadora hasta conseguir un contenido de MS del 45-40%. Tras el secado, realizado por ejemplo en un secadero vibratorio, la caseina se muele hasta un tamaño de partícula correspondiente a tamices de 40, 60 u 80 mesh (un mesh = número de líneas por pulgada; un tamiz de 40 mesh se corresponde con una separación de líneas de 0.64 mm).

Caseina ácida

La leche se acidifica hasta alcanzar el punto isoelétrico de la caseina, que normalmente se corresponde con un pH 4.6, pero que puede variar por la presencia de sales neutras en solución, por lo que puede estar dentro del rango comprendido entre pH 4.0 y pH 4.8. El punto isoeléctrico se consigue cuando la concentración de iones hidronio neutraliza la carga negativa de las micelas de caseina, provocándose la precipitación (coagulación) del complejo de caseina. Esta acidificación se puede

llevar a cabo biológicamente o por la adición de un ácido mineral, por ejemplo ácido clorhídrico (HCl) o ácido sulfúrico (H_2SO_4).

Acidificación biológica - caseina acidoláctica

La caseina acidoláctica se obtiene por medio de una acidificación microbiológica. La leche se pasteuriza y se enfría posteriormente hasta 27-23°C. A continuación se procede a la adición de fermentos mesófilos no productores de gas. El proceso de acidificación hasta alcanzar el pH requerido dura unas 15 horas. Cuando el proceso de acidificación es demasiado rápido se pueden presentar problemas, tales como calidad no uniforme y un rendimiento en caseina reducido. Para su fabricación se utilizan grandes depósitos. Ello significa que, dada la gran cantidad de tiempo que se necesita para vaciar estos tanques, el grado de acidez puede variar.

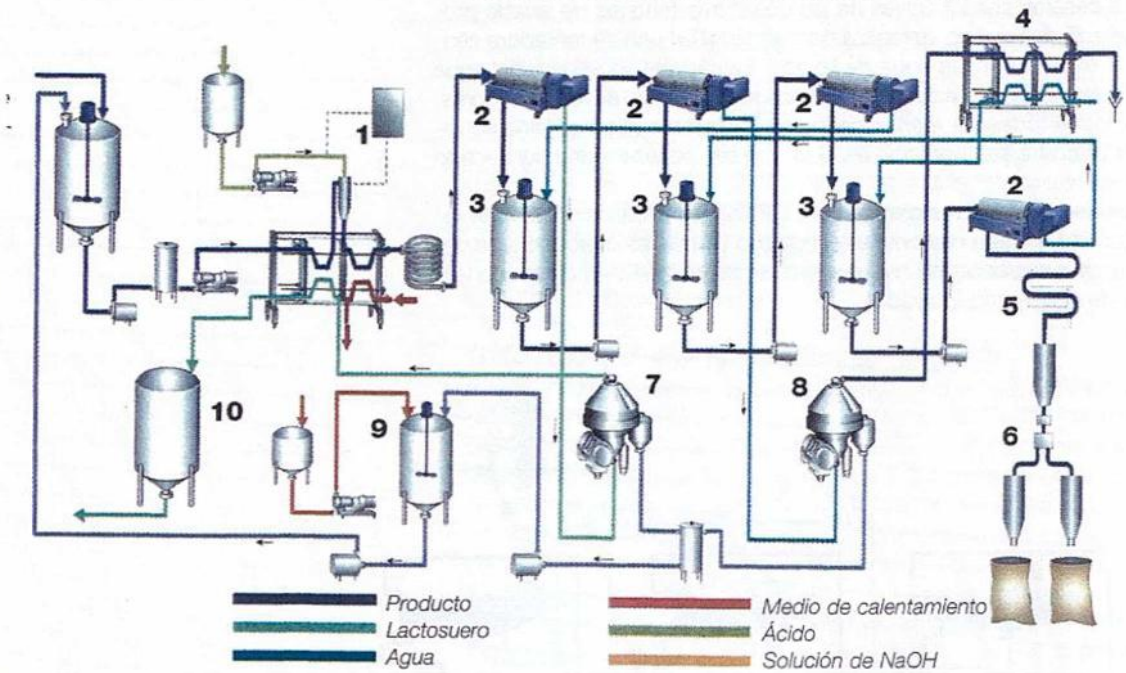


Fig. 20.2 *Línea de proceso para la fabricación de caseina ácida.*
1. Control de pH
2. Decantadora centrífuga
3. Tanque de lavado
4. Intercambiador de calor
5. Secado
6. Molienda, cernido y ensacado
Opcional:
7. Recuperación de finos del lactosuero
8. Recuperación de finos del agua de lavado
9. Disolución de finos
10. Almacenamiento de lactosuero

Cuando se alcanza la acidez requerida, la leche se agita y se calienta hasta 50-55°C en un intercambiador de calor de placas. Tras un corto mantenimiento, el tratamiento que sigue -lavado y secado- es prácticamente el mismo que para la caseina al cuajo.

Acidificación mineral - caseina ácida

La leche se calienta hasta la temperatura requerida, aproximadamente de 32°C. El ácido mineral se añade a continuación para llevar el pH de la leche hasta 4.3-4.6. Después de controlar el pH, la leche se calienta hasta 40-45°C en un intercambiador de calor de placas y se mantiene durante unos dos minutos, formándose agregados uniformes de caseina. Para eliminar todo lo posible el suero antes de que comience el lavado, la mezcla suero/caseina se pasa a través de una decantadora. De esta manera, se necesita menos agua para el lavado.

La Figura 20.2 muestra un diagrama de flujo para una línea de fabricación de caseina ácida. Tal como se puede ver, la planta a partir de la acidificación es casi idéntica a la usada para la producción de caseina al cuajo.

Antes de salir de la planta de proceso, el suero y el agua de lavado se pueden separar mediante centrifugación, recogiéndose los lodos de caseina en un tanque. Cuando se mezclan con un solución alcalina, la caseina se disuelve y a continuación se vuelve a mezclar con la leche desnatada destinada a la producción de caseina.

Tras la separación del agua, la caseina ácida se muele y se envasa en sacos.

La tecnología de producción de caseina ácida desarrollada por Pillet, Francia, también es interesante que se comente.

Después del precalentamiento a 32°C la leche desnatada se acidifica y se introduce en una unidad de coagulación (Figura 20.3). La coagulación se completa tras un calentamiento a aproximadamente 45°C mediante inyección de vapor directo. El

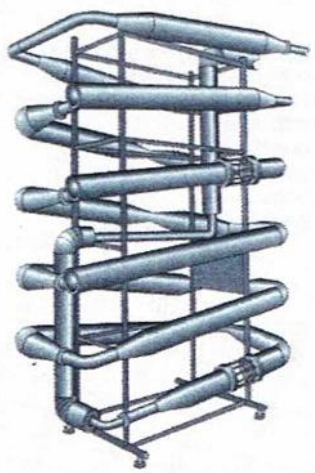


Fig. 20.3 *Coagulación continua, cocción, y unidad de sinéresis para caseinas de ácido láctico, de ácido y de cuajo (Pillet).*

desuerado en una decantadora es seguido de un lavado a contracorriente en una o dos torres de lavado especialmente diseñadas (Figura 20.4).

Antes de ser deshidratada en una unidad vibro-fluidizada, la caseina se pasa por una decantadora para eliminar el máximo de agua.

Co-precipitado

El co-precipitado contiene prácticamente todas las fracciones proteicas de la leche.

Después de la adición de pequeñas cantidades de cloruro cálcico o ácido a la leche desnatada, la mezcla se calienta hasta 85-95°C y se mantiene a esa temperatura durante un período de 1-20 minutos para permitir la interacción entre las caseinas y las seroproteinas. La precipitación de las proteinas de la leche calentada se efectúa a continuación mediante la adición controlada de una solución de cloruro cálcico (para producir un co-precipitado rico en calcio) o de un ácido diluido (para producir un co-precipitado con riqueza media o baja en calcio, dependiendo de la cantidad de ácido añadido y del pH del suero resultante). La cuajada se lava a continuación y se seca para producir co-precipitados insolubles granulares, o se disuelve en alcali tal como se ha descrito en los métodos de fabricación de caseinatos para producir co-precipitados solubles o "dispersables".

Fig. 20.4 *Torre de lavado de cuajada para caseinas de ácido láctico, de ácido y de cuajo (Pillet).*

Caseinatos

El caseinato se puede definir como un compuesto químico de caseina y metales ligeros, por ejemplo sodio monovalente (Na^+) o calcio divalente (Ca^{++}).

Los caseinatos se pueden producir a partir de cuajada de caseina ácida recientemente precipitada ("húmeda") o a partir de caseina ácida seca, por medio de la reacción con cualquiera de las soluciones alcalinas diluidas disponibles, tal como se señala en la Figura 20.5.

Caseinato sódico

La solución alcalina más comunmente usada en la producción de caseinato sódico es la solución de hidróxido sódico (NaOH), con una fuerza de 2.5 M (del 10%). La cantidad de NaOH requerida es generalmente el 1.7-2.2% del peso de sólidos de caseina con el fin de alcanzar un pH final, generalmente de alrededor de 6.7.

Se pueden utilizar otros alcalis, como el bicarbonato sódico o los fosfatos de sodio, pero las cantidades requeridas y sus costes son mayores que los de NaOH. Se utilizan sólo para determinados casos, como en la fabricación de caseinatos citratados.

La viscosidad muy elevada de las soluciones de caseinato sódico de moderadas concentraciones limita su contenido en sólidos a alrededor de un 20% para la atomización.

En cuanto a los procedimientos de fabricación, se ha de decir que el tiempo de disolución está directamente relacionado con el tamaño de partícula y que la reducción del tamaño de partícula antes de la adición de hidróxido sódico, mejor que después, produce una reacción más rápida. Después, la cuajada se pasa a través de un molino coloidal antes de la adición de la solución alcalina.

Después de que se lave la caseina final, la cuajada se puede separar del agua hasta conseguir un 45% de sólidos y a continuación se remezcla con agua (hasta un 25-30% de sólidos) antes de entrar en el molino coloidal. La temperatura del producto saliente debe ser inferior a 45°C, ya que se ha observado que la cuajada molida se puede reaglomerar a temperaturas más altas. Normalmente, el producto saliente del molino coliodal se recoge en un tanque con camisa provisto con un agitador efectivo y que está también integrado en un sistema de circulación con una bomba de elevada capacidad.

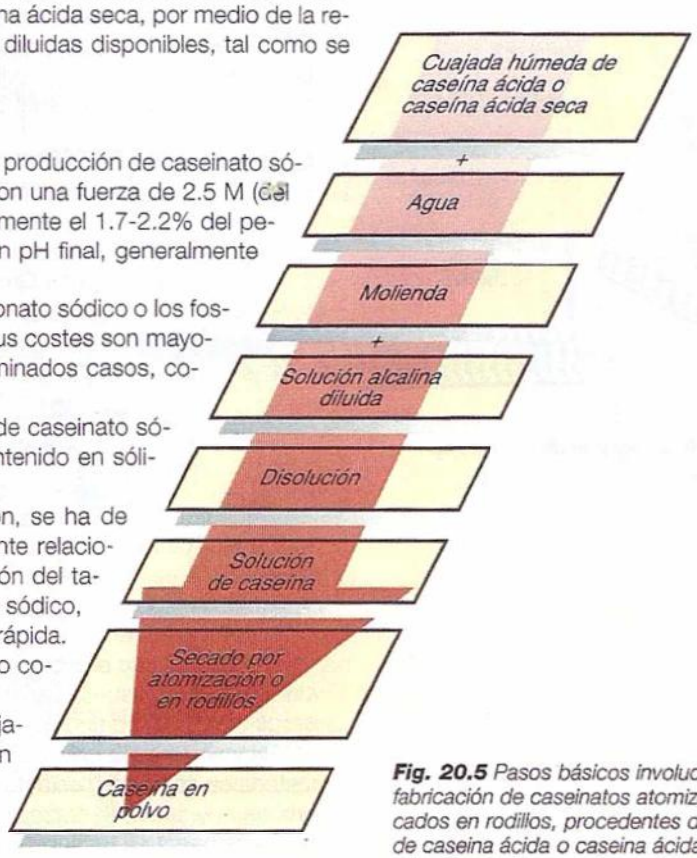


Fig. 20.5 *Pasos básicos involucrados en la fabricación de caseinatos atomizados o secados en rodillos, procedentes de cuajada de caseina ácida o caseina ácida seca. La solución alcalina puede ser de hidróxido sódico, potásico, o cálcico o amoníaco.*

La adición de la solución alcalina diluida debe ser cuidadosamente controlada con el objetivo de alcanzar un pH final de alrededor de 6.7. Preferiblemente, la solución alcalina se dosifica en la linea de recirculación justo antes de la bomba.

Una vez que se ha añadido la solución alcalina al producto saliente del molino coloidal, es importante alcanzar la temperatura de 60-75°C, tan rápidamente como sea posible, para reducir la viscosidad.

El tiempo de disolución del caseinato sódico preparado en lotes es normalmente de 30-60 min.

Para conseguir una atomización eficiente, la solución de caseinato sódico debe tener una viscosidad constante cuando se alimenta al equipo de deshidratación por atomización. Es práctica común minimizar la viscosidad mediante precalentamiento de la solución hasta 90-95ºC justo antes del atomizador.

Caseinato cálcico

La preparación del caseinato cálcico sigue las mismas líneas generales que la del caseinato sódico, con un par de excepciones importantes. Las soluciones de caseinato cálcico pueden ser desestabilizadas por calentamiento, especialmente a valores de pH inferiores a 6.

Se ha encontrado que durante el proceso de disolución, la reacción entre la cuajada de caseína ácida y el hidróxido cálcico tiene lugar a una velocidad mucho más baja que entre la cuajada y el hidróxido sódico. Para aumentar la velocidad de reacción entre la caseína y el hidróxido cálcico, la caseína se debe disolver primero completamente en amoníaco. A continuación se añade el hidróxido cálcico en solución de azúcar, y la solución de caseinato cálcico se seca en secador de rodillos. La mayor parte del amoníaco se evapora durante este proceso.

Otros caseinatos

El caseinato magnésico se ha mencionado brevemente en la bibliografía.

Los compuestos de caseína con aluminio se han preparado para usos médicos, o para uso como emulsionante en productos cárnicos.

Los caseinatos de metales pesados que se han utilizado principalmente con fines terapéuticos incluyen aquellos que contienen plata, mercurio, hierro y bismuto. Los caseinatos de hierro y cobre han sido también preparados por medio de intercambio iónico para uso en productos infantiles y dietéticos.

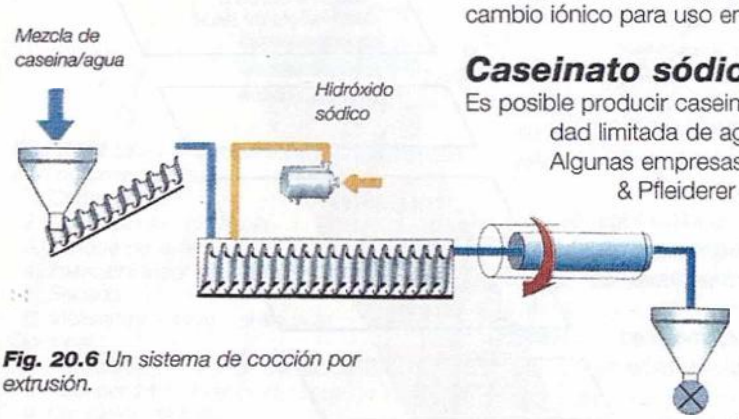


Fig. 20.6 *Un sistema de cocción por extrusión.*

Caseinato sódico extrusionado

Es posible producir caseinato sódico a partir de caseína en presencia de una cantidad limitada de agua por medio del uso de técnicas de extrusión.

Algunas empresas europeas dedicadas a la cocción por extrusión -Werner & Pfleiderer GmbH/Alemania, Clextral/Francia y unas pocas más- han dado a conocer que se obtienen buenos resultados en la producción de caseinato sódico por medio de la cocción por extrusión.

En la mayor parte de la información publicada aparece la cesina seca como materia prima. El agua y la solución alcalina se añaden para formar una mezcla para la extrusión. La mezcla caseína/agua puede tener un contenido de humedad de 10-30%.

La técnica de la extrusión usada en la producción de caseinatos está mostrándose altamente competitiva con la técnica tradicional discontinua, por cargas.

Además, el procesado por extrusión ha sido también probado en la producción de caseína ácida a partir de leche desnatada en polvo. J. Fichtali y F.R. van der Vort han llevado a cabo pruebas en una planta piloto del MacDonald College de la McGill University (de Quebec, Canadá). Estos autores resumen los resultados de sus ensayos (de 1990) como sigue:

"Nuestro trabajo inicial sobre la producción de cuajada ácida a partir de leche desnatada en polvo mediante el procesado por extrusión puso de manifiesto que se tendría que continuar trabajando en el desarrollo del proceso para producir un producto de calidad. Los Estados Unidos, Canadá y la Comunidad Económica Europea han experimentado a veces un excedente crónico de leche, del cual sustanciales cantidades se transforman en leche en polvo. La caseína ácida, de calidad aceptable, se puede producir por extrusión, por medio de la modificación de las condiciones del proceso de extrusión, estudiando la coagulación con elevados contenidos de sólidos y por medio de la optimización de la coagulación y los pasos de lavado. Este proceso es continuo, controlable, utiliza contenidos elevados de sólidos y puede reducir las necesidades de mano de obra y de espacio en planta, con relación a los procesos convencionales. Este material puede servir como alimento para una conversión posterior por extrusión a caseinato sódico, que será discutido en un artículo próximo".

Usos de las caseinas y los caseinatos

Caseina al cuajo

La caseina al cuajo es un producto diferente a la caseina ácida. En la industria se utiliza principalmente en la producción de sustancias artificiales pertenecientes a la categoría de plásticos. La caseina polimerizada con formalina se conoce como galalita, y las fibras sintéticas de caseina son conocidas como lanital. A pesar del gran suministro de distintos plásticos que compiten directamente con la galalita, se tiene todavía cierta demanda de caseina para la producción de galalita. Pequeñas cantidades de caseina al cuajo se utilizan también como materia prima en la elaboración de queso fundido. La caseina al cuajo es insoluble en agua.

Caseina ácida

La caseina ácida domina los mercados mundiales. Se utiliza en la industria química como un aditivo en la fabricación del papel para el satinado de papel de calidad fina. Para las aplicaciones en la industria papelera es particularmente importante que la caseina esté libre de grasa y que no contenga partículas de materiales extraños que puedan formar puntos sobre el papel. Para obtener un contenido de grasa extremadamente bajo en la leche desnatada se debe pasar a través de una planta de microfiltración (MF) en combinación con la pasteurización. Cada industria tiene sus propias especificaciones estrictas de calidad. Las industrias de pinturas y cosméticos son también grandes usuarias de la caseina.

Tabla 20.1
Composición típica de caseinas, caseinatos y coprecipitados.

Calidad	**Estándares para caseina ácida según la categoría**	
	Categoría extra	**Categoría estándar**
Humedad (máx)	10%	12%
Grasa (máx)	1.5%	2%
Acidez libre (máx)	0.20 ml	0.27 ml
Cenizas (máx)	2.2%	2.2%
Contenido de proteinas, base seca	95%	90%
Recuento en placa/g (máx)	30 000	100 000
Recuento Coliformes (máx)/0.1 g	0	0

Calidad	**Estándares para caseina al cuajo**	
	Categoría extra	**Categoría estándar**
Humedad (máx)	12%	13%
Grasa (máx)	1.0%	1.5%
Cenizas	7.5%	7.0%
Color	A	C

Calidad	**Composición típica de caseinatos**	
	Caseinato sódico	**Caseinato cálcico**
Humedad (máx)	3.8%	3.8%
Proteína (Nx6.38)	91.4%	91.4%
Cenizas	3.6%	3.8%
Lactosa	0.1%	0.1%
Grasa	1.1%	1.1%
Sodio	1.2-1.4	<0.1%
Calcio	0.1%	1.3-1.6%
Hierro	3-20 mg/kg	10-40 mg/kg
Cobre	1-2 mg/kg	1.2 mg/kg
Plomo	<1 mg/kg	<1 mg/kg
pH	6.5-6.9	6.8-7.0

Caseinato sódico

Una aplicación de la caseina de importancia creciente es su uso como materia prima en la fabricación de caseinato sódico. La caseina se disuelve fácilmente en una solución alcalina diluida, y el líquido se seca entonces por atomización hasta polvo.

Este polvo es mucho más soluble que la caseina y está siendo utilizada cada vez más por la industria alimentaria. Es utilizada a menudo como emulsionante en carnes curadas y se encuentra en gran cantidad de nuevos productos, tales como los sustitutos de la nata y de la leche.

Como el caseinato de sodio es muy viscoso cuando se disuelve, la concentración máxima que se puede obtener es del 20% a 55-60°C.

Caseinato cálcico

Para ciertas aplicaciones, el caseinato cálcico se puede elegir en lugar del caseinato sódico, siendo una de las razones el deseo de reducir al mínimo el contenido de sodio del producto.

La viscosidad del caseinato cálcico es algo menor que la del caseinato sódico a la misma concentración.

Co-precipitados de calcio

Este producto se puede también disolver en solución alcalina y secarse por atomización, teniendo el mismo campo de aplicación que los caseinatos, pero con la diferencia de que en la producción del co-precipitado de calcio es posible adaptar el proceso con el fin de regular el color, la solubilidad y el contenido en cenizas en estrecha conformidad con las necesidades del usuario.

Una de las ventajas más importantes de la caseina y del caseinato desde el punto de vista nutritivo es el contenido relativamente alto del aminoácido esencial lisina. Además, unas pruebas han mostrado que la lisina se mantiene más tiempo, gracias a la ausencia de lactosa en el entorno. Esto sugiere que las proteinas de la leche se pueden almacenar más convenientemente en forma de caseina y caseinato que, por ejemplo, como leche en polvo.

La caseina producida para usos industriales debe satisfacer las demandas bien establecidas de pureza química. Las nuevas tendencias muestran que la caseina y el precipitado son productos intermedios que encuentran su salida en toda una serie de productos alimenticios y deben por tanto satisfacer unas estrictas demandas en cuanto a especificaciones bacteriológicas y pureza química.

Las lineas de proceso deben diseñarse y construirse de manera que se aseguren unas condiciones higiénicas de fabricación. Como la caseina es un producto estacional en mayor medida que muchos otros productos lácteos, se debe procurar tener la posibilidad de operar la linea de producción de varias maneras sin una demanda excesiva de mano de obra; el consumo de agua se debe mantener dentro de límites razonables.

En estas circunstancias, por tanto, es interesante tratar de diseñar las lineas continuas de producción incorporando por ejemplo centrífugas para la separación del agua de la caseina y recuperar las pérdidas de caseina del lactosuero y el agua de lavado.

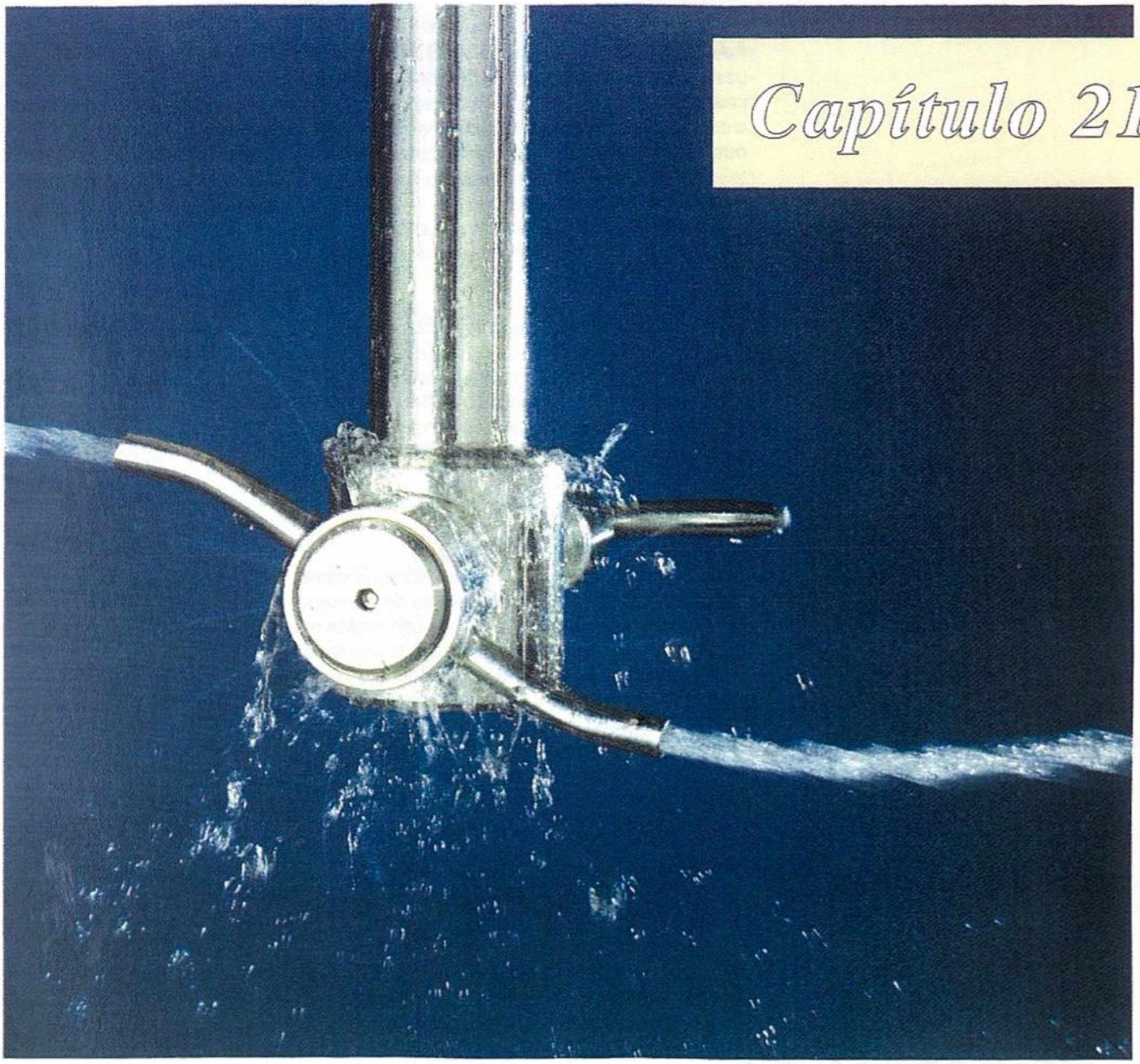
Tabla 20.2

Composición analítica aproximada de los coprecipitados y caseinas granulares[1]

	Caseina de ácido láctico y sulfúrico	Coprecipitados		
		Rico en calcio	Medianamente rico en calcio	Ácido
Humedad(%)	11.5	9.5	9.5	9.5
Grasa (%)	1.4	0.5	0.7	0.9
Cenizas (%)	1.8	7.7	3.7	2.4
Proteinas:				
- Nx6.38 (%)	85.0	81.7	85.6	86.7
-base seca (%)	96.0	90.3	94.5	95.8
Lactosa (%)	0.1	0.5	0.5	0.5
Calcio (%)	<0.1	2.81	1.13	0.54
pH	4.6 - 5.4	6.5 - 7.2	5.6 - 6.2	5.4 - 5.8
pH del lactosuero tras la separación del coágulo	4.3 - 4.6	5.8 - 5.9	5.1 - 5.3	4.9 - 5.1

[1]Fuente: Southward & Aird, 1978

Referencias: Gran parte de la información referente a los caseinatos se ha extraido de una revisión realizada por C R Southward, NZDRI, y publicado en el N.Z.J. of D. Science and Technology, 20, 79-101 (1985).



Capítulo 21

Limpieza de los equipos

Aspectos a tener en cuenta en la limpieza

Las instalaciones de limpieza de los equipos que entran en contacto con los productos son una parte esencial de cualquier planta de procesado de alimentos. Se debe de tener en cuenta que los fabricantes de alimentos están siempre obligados a mantener unos altos niveles de higiene; esto involucra tanto a los equipos de proceso como, naturalmente, al personal implicado en la producción. Esta obligación se puede considerar desde tres puntos de vista:

1. ***Como una obligación comercial***
2. ***Como una obligación moral***
3. ***Como una obligación legal***

Obligaciones comerciales

Los productos buenos, saludables, limpios que se mantienen bien y están libres de riesgos para la salud son obviamente buenos para el mercado; los clientes volverán a comprar el mismo producto si están satisfechos con él. Si, por el contrario, el producto está contaminado, no se conserva bien o está sometido a reclamaciones frente a las autoridades, lo negativo es lo que prevalece, y la publicidad resultante es muy dañina para el producto.

Los efectos potenciales de una pobre limpieza, unos estándares insuficientes y una pobre calidad se han de tener en mente en todo momento.

Obligación moral

La mayoría de los consumidores que consumen los productos nunca han visto la fábrica o cómo se han manejado los productos. Ellos confían en la empresa, ligando su confianza a la reputación de la misma, y dan por sentado que las operaciones son llevadas a cabo bajo las condiciones más exigentes de limpieza, y que son realizadas por un personal que está continuamente vigilante y consciente de estos factores.

Obligación legal

La ley intenta proteger al consumidor y al comprador en cuanto a la salud y a la calidad. Los fallos en el cumplimiento de las obligaciones legales, nacionales o locales, puede tener como consecuencia una acción muy severa. La ejecución de esas sanciones puede ser muy dañina para la reputación de la empresa.

Es sabido que más vale prevenir que curar, por lo que las empresas están obligadas a cumplir con los requerimientos legales y mantener unos estándares elevados. La leche y los productos lácteos por su naturaleza son un medio ideal para el desarrollo de microorganismos, incluyendo muchos patógenos. Como consecuencia de ésto se tiene mucha más legislación acerca de la leche -su producción, manejo, procesado, envasado, almacenamiento y distribución- que legislación sobre otros alimentos. Cada pais tiene sus propias normas nacionales, y a veces locales.

Objetivos de la limpieza

Los siguientes términos se utilizan para definir el grado de limpieza, y están relacionados con la efectividad de la misma:

- Limpieza física - elimina de la superficie toda la suciedad visible;
- Limpieza química - elimina no sólo toda la suciedad visible sino que también elimina los residuos microscópicos que se pueden detectar con el gusto o con el olfato, que no son visibles a simple vista;
- Limpieza bacteriológica - que se consigue mediante la desinfección;
- Limpieza esterilizante - supone la destrucción de todos los microorganismos.

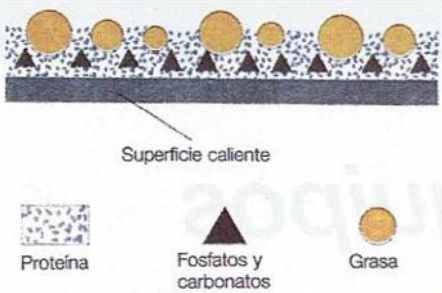


Fig. 21.1 *Depósitos sobre una superficie caliente.*

Es importante destacar que el equipo puede estar bacteriológicamente limpio sin necesidad de estar físicamente o químicamente limpio. Sin embargo, es más fácil conseguir de forma rutinaria una limpieza bacteriológica si las superficies en cuestión son en primer lugar limpiadas físicamente.

En las operaciones de limpieza en la industria láctea el objetivo es inicialmente conseguir tanto la limpieza química como bacteriológica. Las superficies de los equipos son por tanto primero limpiadas con detergentes químicos y después desinfectadas.

Suciedad

¿Qué tipo de suciedad es la que está presente en las superficies de los equipos de las industrias lácteas y que es necesario eliminar?

Consiste en depósitos acumulados sobre las superficies y su composición, en este caso particular, está basada en componentes de la leche que son utilizados por las bacterias "ocultas" en la suciedad.

Superficies calientes

Cuando la leche se calienta por encima de los 60ºC, se empiezan a formar "costras de leche". Este es un depósito de fosfatos de calcio (y magnesio), proteinas, grasa,

etc., que se puede ver facilmente en un intercambiador de calor de placas después de una larga producción, en la sección de calentamiento y en la primera parte de la sección de regeneración que le sigue. Los depósitos se acumulan pegados a las superficies, y durante funcionamientos superiores a ocho horas se puede observar un cambio de color de estos depósitos de blanquecino a marrón. En la Figura 21.1 se muestra un dibujo que ilustra cómo se deposita la suciedad sobre las superficies calientes.

Tabla 21.1
Efectos químicos y características de la suciedad depositada.

Tipo de suciedad	Solubilidad	Facilidad de eliminación	
		Pasteurización baja/media	Pasteurización alta/UHT
Azúcar	En agua	Fácil	*Caramelización* Difícil
Grasa	No en agua	Difícil En álcali	*Polimerización* Difícil
Proteínas	No en agua	Muy difícil En álcali Ligeramente en ácido	*Desnaturalización* Muy difícil
Sales minerales	Variable en agua La mayoría de sales en ácido	Variable	Variable

Es importante destacar que los equipos de proceso pueden estar bacteriológicamente limpios sin necesidad de estar física o químicamente limpios.

Superfices frias

A las paredes de las tuberías, bombas, tanques, etc., se adhiere una capa de leche (se trata de superficies "frias"). Cuando se vacía un sistema, la limpieza ha de comenzar tan pronto como sea posible, o de lo contrario esta película se secará y será más difícil de eliminar.

Procedimientos de limpieza

La limpieza de los equipos de las industrias lácteas se hacía inicialmente a mano (y aún se hace en algunos sitios), mediante cepillos y soluciones de detergentes, desmontando los equipos y entrando a los tanques para tener a mano las superficies a limpiar. Esto era no solamente laborioso sino también muchas veces inefectivo; los productos se reinfectaban a menudo en los equipos que se habían limpiado inadecuadamente.

Los sistemas de limpieza sin desmontar (en inglés *cleaning-in-place, CIP*) por recirculación que se adaptaron a distintas partes de la planta de proceso fueron desarrollados para conseguir una buena limpieza y unos buenos resultados en la desinfección.

Las operaciones de limpieza se deben de llevar a cabo de manera estricta de acuerdo con un procedimiento cuidadosamente estudiado, con el fin de conseguir el grado requerido de limpieza. Esto significa que la secuencia debe ser exactamente la misma cada vez.

El ciclo de limpieza en una industria láctea comprende las siguientes etapas:

- Recuperación de los residuos de producto por medio de un arrastre, drenaje y expulsión con agua o aire comprimido;
- Preenjuagado con agua para eliminar la suciedad suelta;
- Limpieza con detergente;
- Enjuagado con agua limpia;
- Desinfección por calentamiento o con agentes químicos (opcional); si se incluye este paso, el ciclo finaliza con un enjuagado final, si la calidad del agua es buena.

Cada etapa requiere un cierto tiempo de realización para conseguir un resultado aceptable. En la Tabla 21.1 se relacionan algunos efectos químicos y las características de la suciedad.

Recuperación de producto residual

Todos los residuos de producto se han de recuperar de la linea de producción al final de cada ciclo de funcionamiento. Esto es importante por tres razones:

- para minimizar las pérdidas de producto,
- para facilitar la limpieza,
- para reducir la carga contaminante de los vertidos, que a menudo se traducen en considerables ahorros en costes de tratamiento de las aguas residuales.

Se debe de dajar un tiempo para permitir que drene el producto de las paredes de los tanques y las tuberías. Las superficies recubiertas con residuos sólidos, por ejemplo en las máquinas que manejan mantequilla, se deben de limpiar mediante rascado. Antes de que comience la limpieza, la leche remanente se fuerza a salir de las lineas de producción con agua. Si es posible, la leche de las redes de tuberías se puede drenar mediante soplado con aire o con impulsión de agua hasta los tanque colectores de leche.

Preenjuagado con agua

El preenjuagado se debe de llevar a cabo siempre inmediatamente después de un ciclo de producción. De lo contrario los residuos de leche se secarán y se acumularán en las superficies, haciéndose más difícil su limpieza. Los residuos de grasa de leche son más fácilmente arrastrados si el agua de preenjuagado está caliente, pero la temperatura no debe exceder los 55°C para evitar la coagulación de las proteinas.

El preenjuagado debe continuar hasta que el agua que sale del sistema esté clara, ya que cualquier resto de suciedad incrementará el consumo de detergente e inactivará el cloro, si se utiliza, en el detergente. Si se tienen residuos de leche seca sobre las superficies puede ser necesario remojar el equipo. El remojo ablanda la suciedad y hace que la limpieza sea más eficiente.

La mezcla de agua y leche procedente del preenjuagado inicial se puede recoger en un tanque para un procesado especial posterior. Al menos el 90% de los residuos no incrustados, normalmente el 99% de los residuos totales, se pueden eliminar mediante un preenjuagado eficiente.

Como regla general, la limpieza con detergentes alcalinos se debe hacer a la misma temperatura a la que el producto ha sido expuesto, y al menos a 70°C.

Limpieza con detergente

La suciedad de las superficies calientes normalmente se lava con detergentes alcalinos y ácidos, en este orden o en orden inverso, con aplicaciones intermedias de agua, mientras que las superficies frías se limpian normalmente con soluciones alcalinas y sólo ocasionalmente con soluciones ácidas.

Para obtener un buen contacto entre la solución de detergente alcalino, normalmente *sosa caústica (NaOH),* y la película de suciedad, es necesario añadir un *agente humectante* que disminuye la tension superficial del líquido. Normalmente, se utiliza el Teepol (alquil aril sulfonato), un humectante aniónico.

El detergente debe también de ser capaz de *dispersar* la suciedad y *encapsular* las partículas suspendidas para prevenir la floculación. Los polifosfatos son emulsionantes efectivos y agentes dispersantes que también ablandan el agua. Los productos más comúnmente usados son el trifosfato de sodio y los compuestos de fosfato complejo.

Se deben controlar cuidadosamente toda una serie de variables para asegurar satisfactoriamente los resultados que se obtendrán con una determinada solución de detergente. Estas son:

- la concentración de la solución de detergente
- la temperatura de la solución de detergente
- el efecto mecánico sobre las superficies a limpiar (velocidad)
- la duración de la limpieza (el tiempo).

Concentración de detergente

La cantidad de detergente en la solución se ha de ajustar a la concentración correcta antes de que empiece la limpieza. Durante la limpieza, la solución se diluye con el agua de enjuagado y con los residuos de leche. También tiene lugar una cierta neutralización. Por lo tanto, es necesario controlar la concentración durante la limpieza. Un descuido en este control puede afectar seriamente el resultado de la limpieza. El control se puede realizar de forma manual o automáticamente. La dosificación se debe hacer siempre de acuerdo con las indicaciones del suministrador del detergente, ya que un aumento de la concentración no necesariamente mejorará los resultados de la limpieza -incluso puede tener el efecto contrario debido a la formación de espuma, etc. El uso de demasiado detergente simplemente incrementará innecesariamente los costes de la limpieza.

Temperatura del detergente

En general, la efectividad de la solución de detergente se incrementa conforme se incrementa la temperatura. La solución de detergente siempre tiene una temperatura óptima de acción que debe ser utilizada.

Como regla general, la limpieza con detergentes alcalinos se debe realizar a la misma temperatura a la que el producto haya sido expuesto, siendo el mínimo unos 70ºC. Se recomiendan temperaturas de 68-70ºC en la limpieza con detergentes ácidos.

Fig. 21.2 *Ejemplos de utensilios de limpieza mecánica.*
El efecto mecánico se puede conseguir con cepillos según un sistema de limpieza manual, o mediante una suficiente velocidad de flujo en un sistema automático.

Efectos mecánicos de la limpieza

En la limpieza manual se utilizan cepillos para conseguir el efecto mecánico de limpieza deseado (Figura 21.2). En la limpieza mecanizada de las redes de tuberías, tanques y otros equipos de proceso, el efecto mecánico se consigue mediante una adecuada velocidad de flujo de las soluciones de limpieza. Las bombas de alimentación de detergente se dimensionan para conseguir mayores capacidades que para el transporte de producto, con velocidades de flujo de 1.5 - 3.0 m/s en las tuberías. A estas velocidades el líquido fluye de forma muy turbulenta. Esto da lugar a un buen efecto de limpieza sobre las superficies del equipo.

Duración de la limpieza

La duración de la fase de limpieza con detergente se debe calcular cuidadosamente para obtener el efecto óptimo de limpieza. Al mismo tiempo, se han de tener en cuenta los costes de electricidad, calentamiento, agua y mano de obra. No es suficiente con rociar la red de tuberías con una solución detergente. El detergente debe circular un tiempo suficiente para disolver la suciedad. El tiempo que necesite depende del espesor de los depósitos de suciedad (y de la temperatura de la solución de detergente). Un intercambiador de calor de placas con incrustaciones de proteínas coaguladas se debe exponer a una solución de ácido nítrico recirculandose durante unos 20 minutos, mientras que un tratamiento de 10 minutos con solución alcalina es suficiente para disolver la película formada sobre las paredes de un tanque de leche.

Enjuagado con agua limpia

Tras la limpieza con detergentes las superficies se deben de rociar con agua durante un tiempo suficiente para eliminar todas las trazas de detergente. Cualquier detergente saliente del sistema tras la limpieza puede contaminar la leche. Por lo anterior, todas las partes del sistema se han de drenar cuidadosamente tras el enjuagado.

Se prefiere para el enjuagado agua blanda. Esto previene el depósito de incrustaciones de cal sobre las superficies limpias. El agua dura con elevado contenido de sales de calcio debe sufrir un tratamiento de descalcificación en filtros de intercambio iónico hasta 2-4ºdH (Grados alemanes de dureza).

Los equipos y las redes de tuberías son prácticamente estériles tras el tratamiento con soluciones fuertes alcalinas o ácidas a alta temperatura. Pero es necesario prevenir el crecimiento durante la noche de bacterias en las aguas de enjuagado remanentes en el sistema. Esto se puede hacer mediante acidificación de las aguas de enjuagado final hasta un pH de menos de 5 por adición de ácido fosfórico o cítrico. Este entorno ácido previene el crecimiento de la mayoría de las bacterias.

Desinfección

La limpieza con detergentes ácidos o alcalinos llevada a cabo adecuadamente deja el equipo limpio no sólo físicamente sino también químicamente, y en gran medida bacteriológicamente.

El efecto de limpieza bacteriológica se puede mejorar posteriormente por desinfección. Esto deja el equipo virtualmente libre de bacterias. Para ciertos productos (leche UHT, leche estéril) es necesario esterilizar el equipo hasta dejar las superficies completamente libres de bacterias.

El equipo de las industrias lácteas se puede desinfectar de las siguientes maneras:

- Desinfección térmica (con agua hirviente, agua caliente, o vapor);
- Desinfección química (cloro, ácidos, iodóforos, peróxido de hidrógeno, etc.).

La desinfección se puede realizar por la mañana, inmediatamente antes de que comience el procesado de la leche. La leche puede ser admitida tan pronto como se haya drenado todo el desinfectante del sistema.

Si la desinfección tiene lugar al final del día, la solución de desinfectante se debe arrastrar a continuación con agua para evitar que queden residuos que puedan atacar las superficies metálicas.

Sistemas de limpieza CIP (cleaning-in-place)

El nombre de estos sistemas (CIP) significa que el agua de enjuagado y las soluciones de limpieza se hacen circular a través de tanques, tuberías y equipos de proceso sin necesidad de que el equipo se desmonte. El sistema de limpieza CIP se puede definir como la recirculación de líquidos de limpieza a través de máquinas y otros equipos dentro de un circuito de limpieza. El paso de los líquidos a elevada velocidad de flujo sobre las superficies de los equipos genera un efecto de limpieza mecánica que arrastra los depósitos de suciedad. Esto es de aplicación a la limpieza de redes de tuberías, intercambiadores de calor, bombas, válvulas, centrífugas, etc.

La técnica normal de limpieza de grandes tanques es rociar el detergente sobre las superficies de las paredes interiores más altas y permitir que vaya bajando sobre las superficies hacia el fondo del tanque. De esta manera el efecto mecánico es a menudo insuficiente, pero el efecto puede mejorarse en cierta medida mediante el uso de dispositivos de aspersión especialmente diseñados, uno de los cuales se muestra en la Figura 21.3. La limpieza de tanques requiere grandes volúmenes de detergentes, que se deben recircular rápidamente.

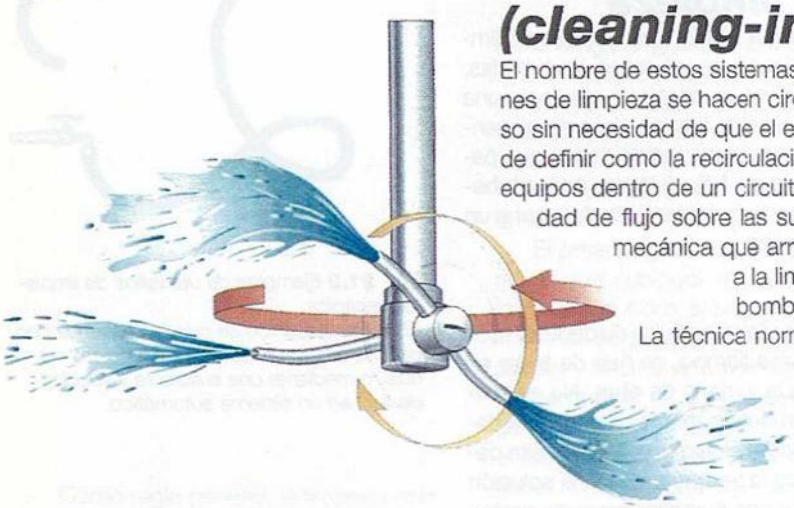


Fig. 21.3 *Turbina de rociado para limpieza de tanques.*
La turbina de rociado consta de dos boquillas rotatorias dispuestas sobre la misma tubería. Una gira en un plano horizontal y la otra en un plano vertical. La rotación se produce como reacción a la eyección desde las boquillas curvadas hacia atrás.

Circuitos CIP

La pregunta de qué tipo de equipo se puede limpiar con un mismo circuito viene solucionada de acuerdo con los siguientes factores:

- Los depósitos de residuos de producto deben ser del mismo tipo, de manera que se puedan utilizar los mismos detergentes y desinfectantes.
- Las superficies de los equipos a ser limpiados han de ser del mismo material o, al menos de materiales compatibles con el mismo detergente y desinfectante a utilizar.
- Todos los componentes del circuito deben estar disponibles al mismo tiempo para realizar la limpieza.

Las instalaciones de las industrias lácteas se dividen en zonas para realizar la limpieza, determinándose así un cierto número de circuitos que se pueden limpiar en diferentes momentos.

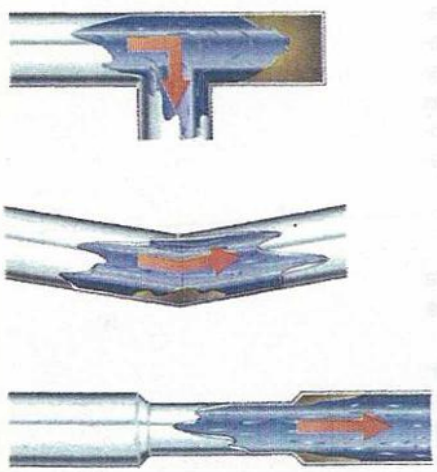


Fig. 21.4 *Ejemplos de montajes de tuberías que dificultan su limpieza.*

Compatibilidad de los materiales de construcción y diseño del sistema

Para conseguir un efectivo sistema de limpieza CIP, los equipos de proceso se han de diseñar para que se puedan acoplar a un circuito de limpieza CIP, y para que sean fáciles de limpiar. Todas las superficies han de ser accesibles a la solución detergente. No se deben tener zonas que el detergente no pueda alcanzar o zonas a través de la cual no pueda fluir (ver la Figura 21.4). Las máquinas y las tuberías se han de instalar de tal manera que se puedan drenar de manera efectiva. Cualquier oquedad o zona que no pueda ser drenada de agua residual supondrá que en esas zonas tenga lugar una rápida multiplicación de bacterias y causar serios riesgos de infección del producto.

Los materiales de los equipos de proceso, tales como el acero inoxidable, los plásticos o los elastómeros, deben ser de tal calidad que no transmitan ningún olor o sabor al producto. Deben ser capaces de resistir el contacto con detergentes y desinfectantes a las temperaturas de limpieza.

En algunos casos las superficies de las tuberías y de los equipos pueden ser atacadas y pueden contaminar el producto. El cobre, el latón y el estaño son sensibles a los ácidos y las bases fuertes. Incluso pequeñas trazas de cobre en la leche da lugar a un sabor a oxidado (aceitoso, sabor a aceite). El acero inoxidable es el material universal para superficies que estarán humedecidas con producto en las modernas industrias lácteas. En este caso no se tienen problemas de contaminación metálica. No obstante, el acero inoxidable puede ser atacado con soluciones de cloro.

La corrosión electrolítica es bastante común cuando se tienen componentes de cobre o latón en un equipo o tanque construido en acero inoxidable. En estas condiciones el riesgo de contaminación es grande. La corrosión electrolítica puede ocurrir también si se limpia un sistema construido con aceros de diferentes tipos mediante agentes de limpieza con cationes activos.

Los elastómeros (como los cauchos de juntas) pueden ser atacados con cloro y agentes oxidantes, que les causan un ennegrecimiento o una rotura, desprendiéndose partículas de caucho a la leche.

Distintos tipos de plásticos utilizados en la construcción de equipos de proceso pueden presentar riesgo de contaminación. Varios de los constituyentes de algunos plásticos pueden ser disueltos por la grasa de la leche. Las soluciones detergentes pueden tener el mismo efecto. Los materiales plásticos para uso en las industrias lácteas deben por tanto satisfacer ciertas normas en cuanto a composición y estabilidad.

Programas CIP

Los programas CIP en las industrias lácteas difieren según el circuito que vaya a ser limpiado, que contenga superficies calientes o no. Se distingue entre:

- Programas CIP para circuitos con pasteurizadores y otros equipos con superficies calientes (UHT, etc.).
- Programas CIP para circuitos con redes de tuberías, tanques y otros equipos de proceso sin superficies calientes.

La diferencia principal entre los dos tipos es que la circulación de ácido se debe incluir siempre en el primer tipo para eliminar las proteinas y las sales incrustadas en las superficies de los equipos de tratamiento térmico. Un programa CIP para un circuito con pasteurizador, de *"componentes calientes"*, puede consistir en las siguientes etapas:

1. Enjuagado con agua caliente durante unos 10 minutos.
2. Circulación de una solución de detergente alcalino (0.5-1.5%) durante unos 30 minutos a 75ºC.
3. Enjuagado del detergente alcalino con agua caliente durante unos 5 minutos.
4. Circulación de una solución de ácido (nítrico) (0.5-1.0%) durante unos 20 minutos a 70ºC.
5. Enjuagado con agua fría.
6. Enfriamiento gradual con agua fría durante unos 8 minutos.

El pasteurizador normalmente se desinfecta por la mañana, antes de que comience la producción. Esto se suele hacer mediante la circulación de agua caliente a 90-95ºC durante 10-15 minutos después de que la temperatura del retorno sea al menos de 85ºC.

En algunas plantas, tras el preenjuagado con agua, el sistema CIP se programa para comenzar con el detergente ácido para eliminar primero las sales precipitadas y romper así las capas de suciedad para facilitar la disolución de las proteinas mediante la solución alcalina que se aplicaría después. Si se va a hacer la desinfección con productos químicos clorados, existe un riesgo inminente de problemas de rápida corrosión si quedan restos en las superficies de detergente ácido. Entonces, cuando se comience con la limpieza alcalina y se finalice con la limpieza ácida tras un enjuagado intermedio con agua, la planta se debe rociar con una solución alcalina débil para neutralizar el ácido antes de realizar la desinfección con un agente químico clorado.

Un programa CIP para un circuito con tuberías , tanques y otros *"componentes fríos"* puede comprender las siguientes etapas:

1. Enjuagado con agua caliente durante 3 minutos.
2. Circulación de un detergente alcalino al 0.5-1.5% a 75ºC durante unos 10 minutos.
3. Enjuagado con agua caliente durante unos 3 minutos
4. Desinfección con agua caliente a 90-95ºC durante 5 minutos.

Los pasos de la limpieza CIP de componenetes "frios" son:
1. Enjuagado con agua
2. Circulación de detergente alcalino
3. Enjuagado con agua
4. Desinfección con agua caliente
5. Enfriamiento con agua de red.

5. Enfriamiento gradual con agua fría durante unos 10 minutos (normalmente no se realiza el enfriamiento en tanques).

Diseño de los sistemas CIP

En la práctica no existe limitación para satisfacer las exigentes demandas individuales en cuanto al tamaño y complejidad de las plantas CIP.

La estación CIP de una industria láctea consta de todos los equipos necesarios para realizar el almacenamiento, monitorización y distribución de los fluidos de limpieza a los distintos circuitos CIP. El diseño exacto de la estación viene determinado por muchos factores, tales como:

- ¿Cómo se van a servir los circuitos CIP individuales desde la estación central? ¿Cuántos circuitos son "calientes" y cuántos son "fríos"?
- ¿Se va a recuperar la leche arrastrada en las aguas de preenjuagado? ¿Esta leche se procesará (por evaporación)?
- ¿Qué método de desinfección se utilizará? ¿Químico, vapor o agua caliente?
- ¿Las soluciones detergentes se utilizarán sólo una vez o se recuperarán para su reutilización?
- ¿Cuál es la demanda estimada de vapor, instantánea y total, para limpieza y desinfección?

Si se analiza la historia de los sistemas CIP se encuentran dos escuelas que defienden:

1. La limpieza centralizada.
2. La limpieza descentralizada.

Hasta finales de los cincuenta, la limpieza era descentralizada. Los equipos de limpieza se localizaban en la industria láctea junto al equipo de proceso. Los detergentes se mezclaban a mano hasta la concentración requerida -un indeseable y arriesgado procedimiento para el personal involucrado. El consumo de detergentes era alto, lo que hacía que la limpieza fuese cara.

El sistema CIP centralizado se desarrolló durante los años sesenta y setenta. Se instalaba en la industria láctea una sóla estación CIP central. El agua de enjuagado, las soluciones calientes de detergente y el agua caliente se suministraban desde esta unidad por medio de una red de tuberías hasta todos los circuitos CIP de la industria láctea. Después, las soluciones utilizadas se retornaban mediante bombas hasta la estación central, y desde aquí a sus respectivos tanques colectores. Los detergentes recuperados de esta manera se podían ajustar de nuevo hasta la concentración correcta y ser reutilizados hasta que estuvieran excesivamente contaminados con suciedad, siendo entonces vertidos.

Los sistemas CIP centralizados trabajan bien en muchas industrias lácteas, pero en las industrias que son muy grandes las lineas de comunicación entre la estación central y los circuitos CIP periféricos son excesivamente largas. Los sistemas de tuberías CIP contienen grandes volúmenes de líquido, incluso cuando son "drenadas". El agua que queda en las tuberías tras el preenjuagado diluye la solución de detergente, lo que significa que se deben añadir grandes cantidades de detergente concentrado para mantener la concentración correcta. Cuanto mayor es la distancia, mayores son los costes de limpieza. De esta manera se justifica que haya cierto movimiento hacia las estaciones CIP descentralizadas en grandes industrias lácteas al final de los años setenta. Cada departamento tiene así su propia estación CIP. A continuación se comentan ejemplos de los dos sistemas.

Sistemas CIP centralizados

Los sistemas centralizados se utilizan principalmente en pequeñas industrias lácteas con lineas de comunicación relativamente cortas, como el ejemplo que se muestra en la Figura 21.5.

El agua y las soluciones de detergentes se bombean desde los tanques de almacenamiento de la estación central hasta los distintos circuitos CIP.

Las soluciones de detergente y el agua caliente se mantienen calientes en tanques aislados. Las temperaturas requeridas se mantienen mediante intercambiadores de calor. El agua de enjuagado final se recoge en el tanque de agua de enjuagado y se utiliza como agua de preenjuagado en el siguiente programa de limpieza. La mezcla leche/agua procedente del primer enjuagado con agua se recoge en el tanque de leche de enjuagado.

Las soluciones de detergente se deben verter cuando se han ensuciado tras repetidos usos. El tanque de almacenamiento correspondiente se ha de limpiar después de este vertido y se debe volver a llenar con nuevas soluciones de detergen-

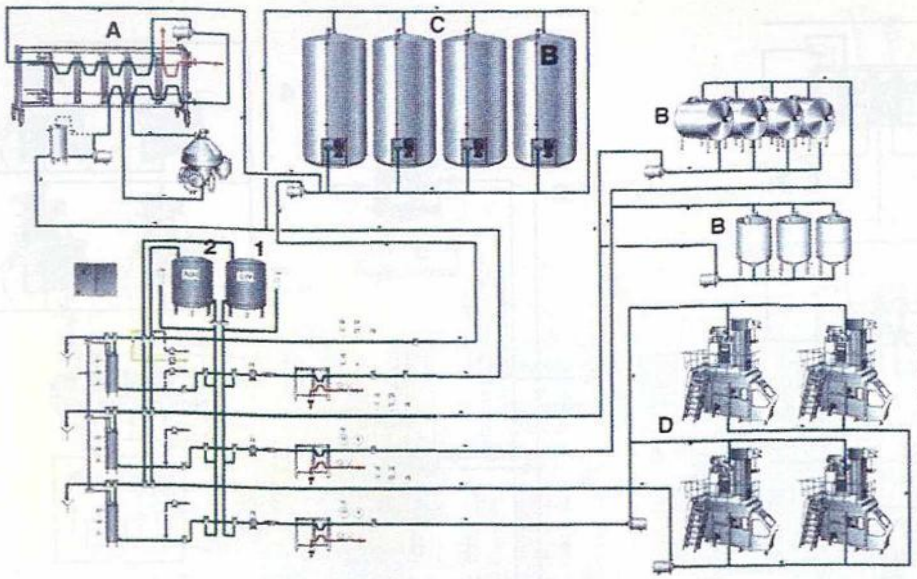
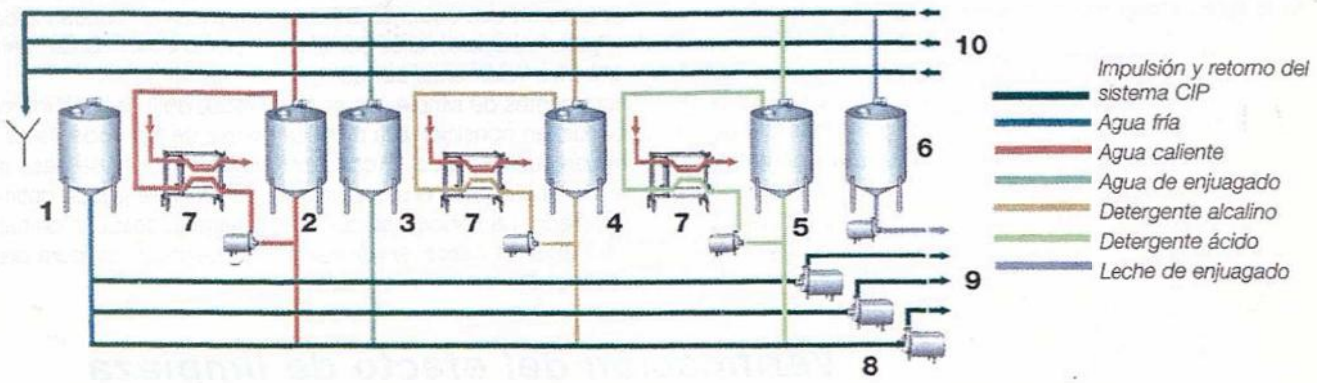


Fig. 21.5 *Prinipio del sistema CIP centralizado.*
Unidad de limpieza (dentro de la línea de trazos)
1. Tanque para detergente alcalino
2. Tanque para detergente ácido
Objetos a ser limpiados:
A. Tratamiento de leche
B. Grupos de tanques
C. Tanques silo
D. Máquinas de envasado

te. También es importante vaciar y limpiar los tanques de agua, especialmente el tanque de agua de enjuagado, a intervalos regulares para evitar el riesgo de infección de la linea de proceso limpia.

Un ejemplo de diseño de una estación CIP centralizada se ilustra en la Figura 21.6.

Una estación de este tipo normalmente está muy automatizada. Los tanque tienen electrodos para monitorización del nivel alto y bajo. El retorno de las soluciones de limpieza está controlado mediante transmisores de conductividad. La conductividad es proporcional a las concentraciones normalmente usadas en la limpieza. En la fase de enjuagado con agua la concentración de la solución detergente es cada vez más baja. En este valor se produce un cambio sobre la posición de las válvulas que envían el líquido a drenaje y no al tanque colector de detergente. Los programas CIP se controlan desde un controlador de secuencia computerizado. Las grandes estaciones CIP pueden estar equipadas con múltiples tanques para conseguir la capacidad adecuada.



Sistemas CIP descentralizados

Los sistemas CIP descentralizados constituyen una atractiva alternativa para las grandes industrias lácteas donde las distancias entre una estación CIP central y los circuitos CIP periféricos podrían ser extremadamente largas. La gran estación CIP central es reemplazada por una serie de unidades más pequeñas localizadas cerca de los distintos grupos de equipos de proceso de la industria láctea.

La Figura 21.7 ilustra el principio de un sistema CIP descentralizado, también denominado sistema CIP satélite. Este aún tiene una estación central para el almacenamiento de los detergentes ácidos y alcalinos, que son distribuidos individualmente a las unidades CIP mediante lineas de distribución. El suministro y calentamiento del agua de enjuagado (y detergente ácido cuando se necesite) se solucionan localmente en las estaciones satélites, una de las cuales se muestra en la Figura 21.8.

Estas estaciones operan según el principio de que las distintas etapas del programa de limpieza se llevan a cabo con un volumen mínimo de líquido cuidadosa-

Fig. 21.6 *Diseño general de una estación CIP centralizada.*
1. Tanque de agua fría
2. Tanque de agua caliente
3. Tanque de agua de enjuagado
4. Tanque de detergente alcalino
5. Tanque de detergente ácido
6. Tanque de leche de enjuagado
7. Intercambiador de calor de placas de calentamiento
8. Bombas impulsión del sistema CIP
9. Líneas de impulsión del sistema CIP
10. Líneas de retorno del sistema CIP

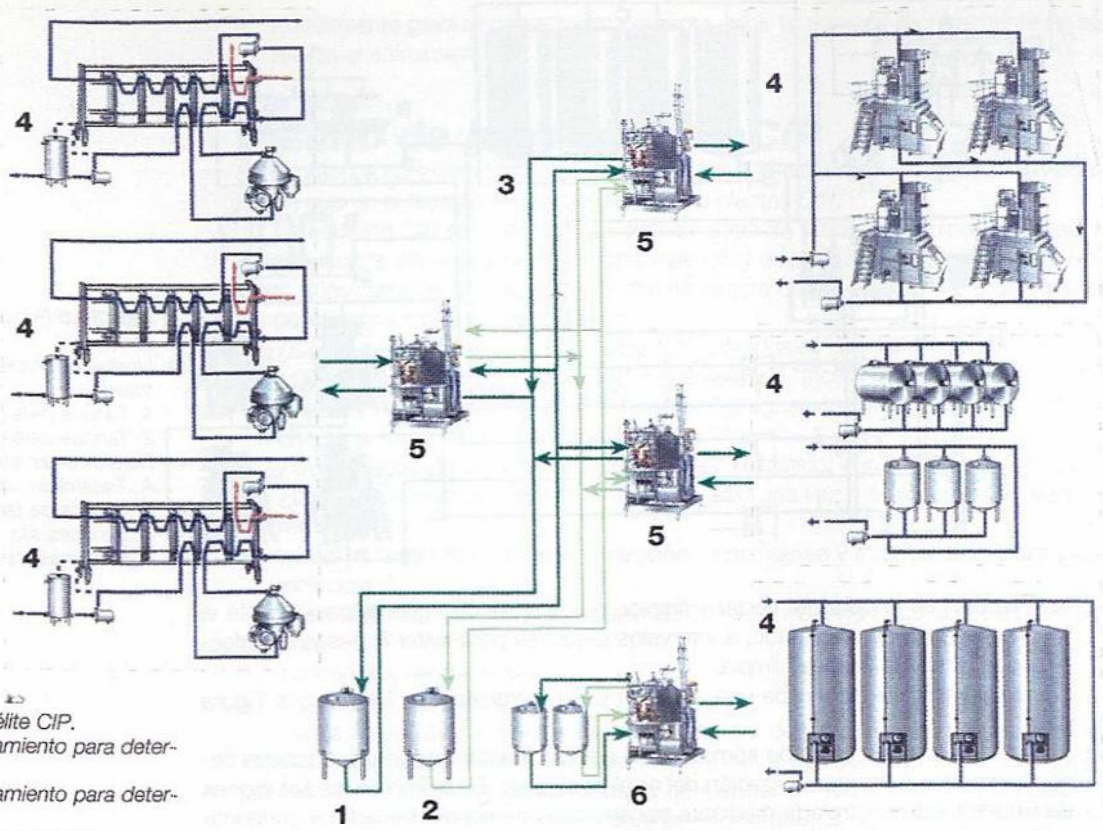


Fig. 21.7 *Sistema satélite CIP.*
1. *Tanque de almacenamiento para detergente alcalino*
2. *Tanque de almacenamiento para detergente ácido*
3. *Líneas en anillo para detergentes*
4. *Equipos a limpiar*
5. *Unidad satélite CIP*
6. *Sistema CIP descentralizado con sus propios tanques de detergente*

mente medido -justo el suficiente para llenar el circuito que se va a limpiar. Se utiliza una bomba de circulación potente para impulsar el detergente a través del circuito a una elevada velocidad de flujo.

El principio de circulación de pequeñas cantidades de soluciones de limpieza tiene muchas ventajas. El consumo de agua y vapor, tanto el instantáneo como el total, se pueden reducir mucho. Los residuos de leche procedente de los primeros enjuagados se obtienen más concentrados por lo que son más fáciles de manejar y más económicos de evaporar. Los sistemas CIP descentralizados reducen la carga contaminante de las aguas residuales, si se comparan con los sistemas CIP centralizados, que utilizan grandes volúmenes de líquido.

El concepto de detergentes de simple uso se ha introducido junto con los sistemas CIP descentralizados, en oposición a la práctica normal de reciclado de los detergentes en los sistemas centralizados. El concepto de un sólo uso se basa en la suposición de que la composición de la solución de detergente se puede optimizar para un circuito determinado. La solución se considera gastada después de haberse utilizado una vez. En algunos casos, sin embargo, se puede utilizar para preenjuagado en un programa posterior.

Verificación del efecto de limpieza

La verificación del efecto de limpieza se debe considerar como una parte esencial de las operaciones de limpieza. Puede adoptar dos formas: inspección visual y bacteriológica. Debido al avance de la automatización, las lineas de proceso hoy en día son raramente accesibles para inspección visual. Esto se debe reemplazar por una monitorización bacteriológica, concentrada en cierto número de puntos estratégicos en la línea. Los resultados de la limpieza CIP se controlan normalmente mediante cultivos de bacterias coliformes. Cuando se hace un test de limpieza de una superficie, el criterio es encontrar menos de *una bacteria coliforme por cada 100 cm^2* de superficie controlada. El resultado es inaceptable si el recuento es superior. Estos tests se pueden hacer sobre las superficies del equipo después de haberse realizado el programa CIP. Esto se aplica a los tanques y a las redes de tuberías, sobre todo cuando se detectan recuentos excesivamente altos de bacterias en el producto. Las muestras se toman a menudo del agua de enjuagado final o del primer producto que pasa a través de la línea tras la limpieza.

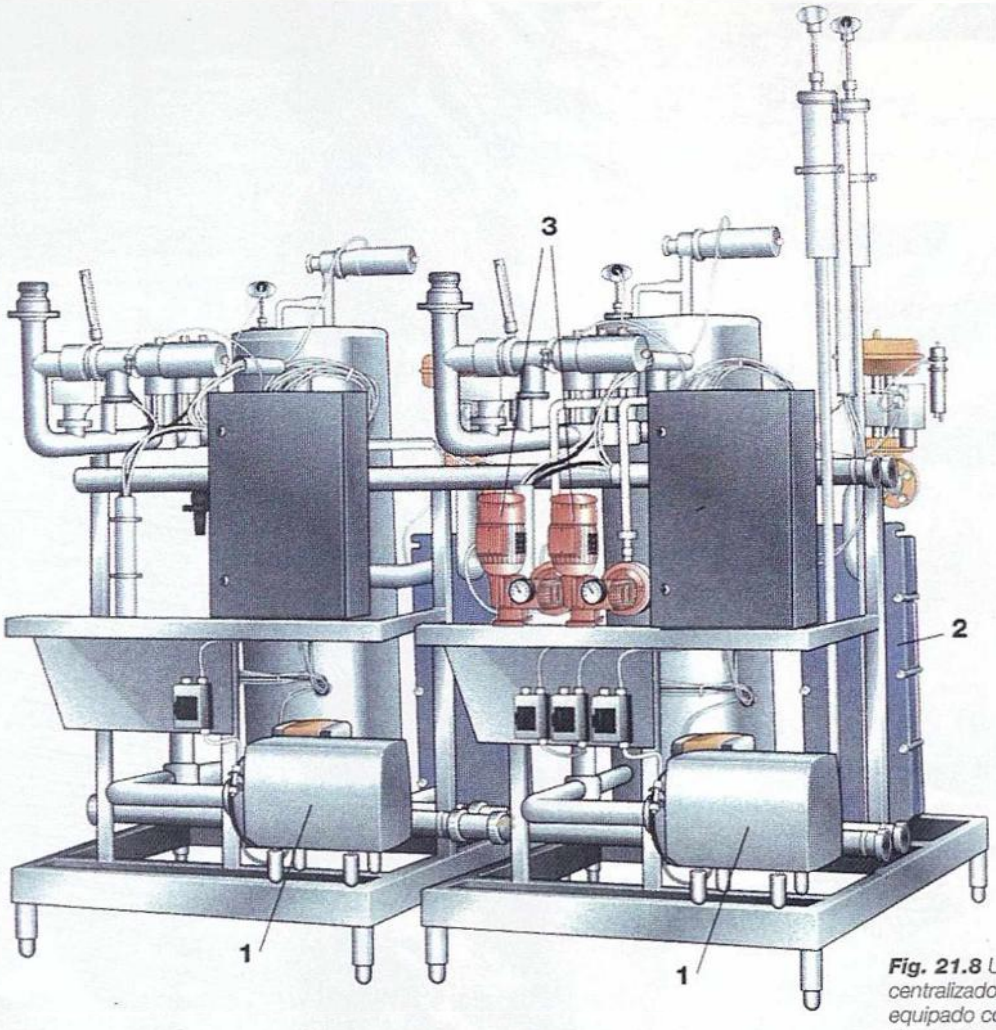


Fig. 21.8 *Unidad CIP de un sistema descentralizado con dos líneas de limpieza y equipado con dos tanques de circulación y dos bombas dosificadoras para detergente concentrado conectadas a los tanques de recuperación de detergente y agua de enjuagado.*
1. Bombas de impulsión
2. Intercambiador de calor
3. Bombas dosificadoras

Todos los productos se han de controlar en cuanto a calidad bacteriológica en sus envases para obtener un completo control de calidad de los procesos de fabricación. El programa completo de control de calidad, además del test de coliformes, también incluye la determinación del recuento total de microorganismos y un control organoléptico (catas).

Capítulo 22

Efluentes de las industrias lácteas

En mayor o menor medida el agua que se utiliza en aplicaciones domésticas e industriales se convierte en agua contaminada. El agua se utiliza también como medio de transporte para eliminar productos residuales. En la medida en que crece el reconocimiento de la importancia de la mejora de los estándares de tratamiento del agua, los requerimientos de proceso se hacen cada vez más precisos. La industria alimentaria contribuye en gran medida a la contaminación, sobre todo en lo que se refiere a contaminantes de origen orgánico. Los contaminantes orgánicos normalmente están formados por 1/3 de sustancias disueltas, 1/3 de coloidales y 1/3 de sustancias en suspensión, mientras que los materiales inorgánicos se presentan sobre todo en solución.

Contaminantes orgánicos

La forma normal de expresar la concentración de un contaminante es especificar la cantidad total por unidad de volumen de agua residual. Otra manera más moderna de analizar la presencia y las cantidades de sustancias orgánicas en los efluentes es la cromatografía líquida (HPLC, *High-Performance Liquid Chromatography*).

Sin embargo, la cantidad de sustancias orgánicas normalmente se determina en la forma de:

- Demanda biológica de oxígeno (DBO)
- Demanda química de oxígeno (DQO)
- Pérdidas por calcinación
- Carbono orgánico total (COT)

Demanda biológica de oxígeno (DBO)

La DBO es una medida del contenido de sustancias degradables biológicamente en las aguas residuales.

La DBO es la medida del contenido de sustancias degradables biológicamente en las aguas residuales. Las sustancias son degradadas por los microorganismos en presencia de (y también con consumo de) oxígeno. La demanda de oxígeno es medida en términos de cantidad de oxígeno consumido por los microorganismos durante un período de cinco días (DBO_5) o siete día (DBO_7), en la descomposición de los contaminantes orgánicos en las aguas residuales a una temperatura de 20°C. La DBO se expresa en mg oxígeno/l ó g oxígeno/m^3.

La siguiente relación es admitida para las aguas residuales municipales:

$DBO_7 = 1.15 \times DBO_5$

Demanda química de oxígeno (DQO)

La DQO indica la cantidad de contaminantes en las aguas residuales que pueden ser oxidados por un oxidante químico. Los reactivos normalmente utilizados para este fin son soluciones fuertemente ácidas (para asegurar una oxidación completa) de dicromato potásico y permanganato potásico a alta temperatura. El consumo de oxidante proporciona una medida del contenido de sustancia orgánica y se convierte a la cantidad correspondiente de oxígeno, expresando el resultado como mg oxígeno/l o g oxígeno/m3.

La DQO indica la cantidad de contaminantes en las aguas residuales que se pueden oxidar por medio de oxidantes químicos.

El ratio DQO/DBO indica lo degradable biológicamente que es el efluente. Los valores bajos, por ejemplo < 2, indican que las sustancias son fácilmente (relativamente) degradables, mientras que los valores altos indican lo contrario. Sin embargo, esta relación no puede ser utilizada en general, aunque un valor típico del ratio DQO/DBO para las aguas residuales municipales es a menudo < 2.

En el Boletín FIL-IDF sobre los Efluentes de las Industrias Lácteas (Dairy Effluents, Document 138,1981) Doedens informaba que el ratio DQO/DBO_5 para los efluentes generados en diferentes grupos de industrias lácteas que producían leche líquida, mantequilla o queso oscilaba entre 1.16 y 1.57, con una media de 1.45, mientras que en otros grupos de industrias lácteas que producían leche en polvo, lactosuero en polvo, lactosa y caseína, el ratio variaba entre 1.67 y 2.34, con una media de 2.14. No obstante, la conclusión general del Boletín FIL-IDF refiriéndose a lo anterior es que el ratio DQO/DBO establecido para una industria láctea no puede ser transferido con suficiente fiabilidad a otra industria similar.

Pérdidas por calcinación

Las pérdidas por calcinación se obtienen determinado primero el contenido de sólidos secos en una muestra, y a continuación calcinándola de forma que la sustancia orgánica se queme. La diferencia de peso entre antes y después de la calcinación representa la cantidad de sustancia orgánica. El valor se expresa en %.

Carbono orgánico total (COT)

El COT es otra medida de la cantidad de material orgánico, determinado mediante la medida de la cantidad de dióxido de carbono producido en la combustión de una muestra. La unidad es mg/l.

Contaminantes inorgánicos

Los componentes inorgánicos de las aguas residuales son casi completamente sales minerales, y son determinadas en gran medida por medio de la composición iónica y la concentración salina del agua. La presencia de estas sales en las aguas residuales normalmente no es importante. Los procesos de tratamiento de los

efluentes hoy en día se centran en la reducción del nitrógeno, sales fosfóricas y metales pesados.

El nitrógeno y los compuestos fosfóricos son importantes, ya que son nutrientes para los organismos, por ejemplo las algas, en los embalses. Como consecuencia del crecimiento de las algas, otros procesos secundarios pueden tener lugar en el ambalse, formando sustancias orgánicas adicionales que, cuando se descomponen, pueden aumentar considerablemente la demanda de oxígeno que sería causada en principio por los contaminantes orgánicos de los efluentes.

Aguas residuales de las industrias lácteas

Las aguas residuales de las industrias lácteas se pueden dividir en tres categorías:

1. Aguas de enfriamiento
2. Aguas residuales sanitarias
3. Aguas residuales industriales

Agua de enfriamiento

Como el agua de enfriamiento normalmente está libre de contaminantes se descarga en los colectores de aguas pluviales, o de deshielo de la nieve.

Aguas residuales sanitarias

Las aguas residuales sanitarias normalmente se recoge en colectores que van directamente a la planta de tratamiento de aguas residuales con mezcla inicial o no con las aguas residuales industriales.

Aguas residuales industriales

Las aguas residuales industriales proceden de reboses de leche y productos, y de la limpieza de los equipos que han estado en contacto con los productos lácteos. La concentración y la composición de estas aguas residuales dependen del plan de producción, de los métodos de operación y del diseño de la planta de proceso.

Tabla 22.1
DBO de algunos productos lácteos.

Producto	DBO_5 mg/l	DBO_7 mg/l
Nata, 40% grasa	400.000	450.000
Leche entera, 4% grasa	120.000	135.000
Leche desnatada, 0.05% grasa	70.000	80.000
Lactosuero, 0.05% grasa	40.000	45.000
Lactosuero conc., 60% MS	400.000	450.000

Las plantas de tratamiento de las aguas residuales se dimensionan para tratar una cierta cantidad de sustancias orgánicas y también para ser capaces de absorber ciertos picos de carga. Sin embargo, una sustancia orgánica -la grasa- presenta problemas especialmente difíciles. Además de tener una alta DBO (la nata con un 40% de grasa tiene una DBO_5 de alrededor de 400.000 mg oxígeno/l. mientras que la leche desnatada tiene unos 70.000 mg/l), la grasa se acumula en las paredes de las tuberías principales y causa problemas en el tanque de sedimentación ya que tiende a subir a la superficie.

Las aguas residuales de las industrias lácteas deben pasar, por tanto, por una planta de flotación donde se airean con "aire de dispersión" (el método que consiste en suministrar burbujas de aire dispersas finamente al agua a una presión de 400-600 kPa se denomina flotación por aire disuelto). Las burbujas de aire atacan ellas mismas a la grasa, llevándola rápidamente hacia la superficie donde se separa, manualmente o mecánicamente dependiendo del tamaño de la planta. La planta de flotación a menudo se localiza cerca de los edificios de la industria y las aguas residuales pasan a su través según un flujo continuo.

El efluente desengrasado se puede mezclar a continuación con las aguas residuales sanitarias que van hacia la planta de tratamiento de las aguas residuales. La Tabla 22.1 relaciona la DBO de algunos productos lácteos.

pH de los efluentes lácteos

El pH de las aguas residuales de las industrias lácteas varía entre 2 y 12 como resultado del uso de detergentes ácidos y alcalinos en la planta de limpieza.

Las aguas residuales con un pH superior a 10 o inferior a 6.5 no se deben descargar directamente al sistema de tratamiento de aguas residuales.

Tanto los valores bajos de pH como los altos interfieren la actividad de los microorganismos que descomponen los contaminantes orgánicos en la etapa de tratamiento biológico de la planta de tratamiento de aguas residuales, transformándolos en lodos biológicos (detritos celulares).

Como regla general, el agua residual con un pH por encima de 10 o por debajo de 6.5 no se debe descargar al sistema de tratamiento de aguas residuales, ya que puede ocasionar corrosión de las tuberías. Los detergentes utilizados serán, por lo tanto, normalmente recogidos en un tanque de mezcla, a menudo localizado cerca de la planta de limpieza, midiéndose el pH y regulándose hasta, por ejemplo, pH 7.0 antes de descargarlos a los colectores de aguas residuales.

Reducción de la cantidad de contaminantes en las aguas residuales

Es necesario controlar constantemente y prevenir el despilfarro de agua y de producto en la planta de proceso.

Las pérdidas ocultas de agua en las tuberías enterradas u ocultas se pueden detectar mediante lecturas del contador de agua y registro de la cantidad usada al final del día.

Los registros diarios de consumo de agua se deben comparar a continuación con la cantidad diaria de leche que se ha procesado. El consumo de agua, expresado en m^3 por tonelada de leche tratada, se debe representar gráficamente y consultarse con frecuencia (por lo que debe tenerse en un lugar fácilmente accesible). Un ratio típico de consumo de agua (litros de agua/litro de leche) es de 2.5/1, pero con un intenso ahorro de agua es posible llegar a ratios inferiores a 1/1.

Las siguientes recomendaciones generales pueden servir como guía para reducir el despilfarro de agua y producto:

Tratamiento general de la leche

- En la recepción de la leche, particularmente cuando las cisternas se vacían, es importante que la salida de las cisternas esté al menos 0.5 m por encima de los tanques o envases de recepción, y que las conexiones de las mangueras estén bien ajustadas, para asegurar que las cisternas se drenan completamente.
- Todas las tuberías se han de identificar y marcar para evitar errores de conexión que podrían dar lugar a mezclas indeseadas de productos así como a pérdidas de leche.
- Cuando se instalen las tuberías se deben de dejar con un ligera y correctamente calculada pendiente para que sean autodrenantes. Además, las tuberías han de estar bien soportadas para prevenir vibraciones, que podrían causar que se separaran ligeramente las uniones y producirse derrames de leche.
- Todos los tanques han de estar equipados con controles de nivel para prevenir reboses. Cuando se alcancen los niveles permitidos más altos, o bien se ha de detener automáticamente la bomba de alimentación y avisar al operador de la planta, o se puede activar un sistema de válvulas automáticas para conducir el producto a otro tanque preseleccionado.
- Es mejor prevenir el derrame de producto que recogerlo después con una manguera. Se ha de intentar tener los suelos secos, lo que facilita la detección de derrames.
- Estar seguros de que la red de tuberías y los tanques están completamente vacíos antes de empezar el enjuagado con agua.

- Controlar que las uniones sean estancas al aire; si entra aire en la red de tuberías se producirá un incremento de quemados en las superficies de intercambio de calor, problemas de erosión en los homogeneizadores y formación de espuma en la leche y en los tanques de nata (que serán más difíciles de vaciar completamente).

Area de producción de queso

- Estar seguros de que las tinas de cuajado abiertas no se llenan a tope; detener el llenado cuando el nivel de leche esté al menos 10 cm por debajo del borde.
- Recoger el lactosuero cuidadosamente, y tratar de encontrarle usos comerciales en lugar de descargarlo como agua residual.
- La cuajada que se derrame al suelo se ha de recoger y tratar como un residuo sólido - no se ha de verter al colector arrastrándola con agua.

Area de producción de mantequilla

- La nata y la mantequilla se acumulan más rapidamente que la leche en las superficies con las que entran en contacto, y agravarán la contaminación de las aguas residuales a menos que se eliminen antes de que comience la limpieza.
- Al final de la producción de mantequilla, todas las superficies accesibles se deben de limpiar rascando a mano.
- La nata y la mantequilla remanente se pueden eliminar entonces con vapor y agua caliente y recogerse en un envase para sufrir un tratamiento por separado.

Area de producción de leche en polvo

- Los evaporadores deben funcionar con el nivel más bajo posible para prevenir la sobrecocción.
- La reutilización de los condensados como agua de enfriamiento tras pasar por una torre de enfriamiento, o como agua de alimentación de la caldera.
- Los derrames de productos secos se han de recoger y tratar como un residuo sólido.

Area de envasado de leche

- Las máquinas de llenado pueden ir provistas de salidas de descarga de drenaje en uno o más contenedores.
- Los envases devueltos se pueden vaciar en contenedores y la mezcla de líquidos dulces y acidificados se pueden utilizar en alimentación animal.

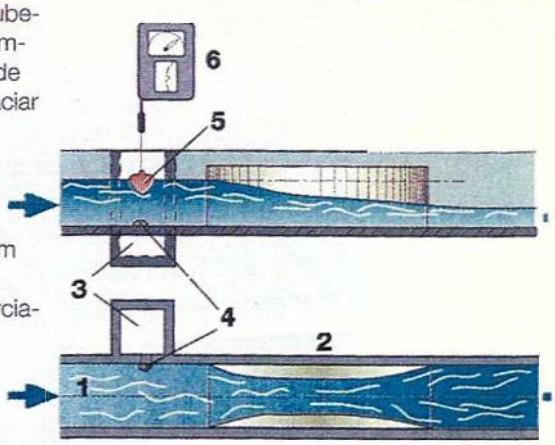


Fig. 22.1 *Sistema de medida del caudal en un canal abierto con estrechamiento venturi.*
1. Canal de aguas residuales
2. Estrechamiento venturi
3. Arqueta de medida
4. Conexión entre el canal y la arqueta de medida
5. Boya
6. Dispositivo de medida y registro

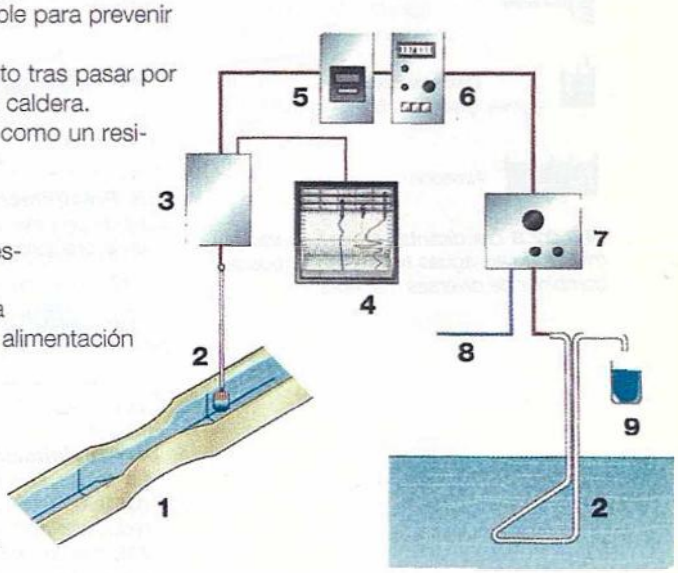


Fig. 22.2 *Sistema automático de muestreo.*
1. Estrechamiento de medida
2. Sonda de medida
3. Transmisor de caudal
4. Registrador
5. Dispositivo acumulador
6. Unidad de control
7. Subunidad
8. Aire
9. Envase de toma de muestras

Control de los vertidos

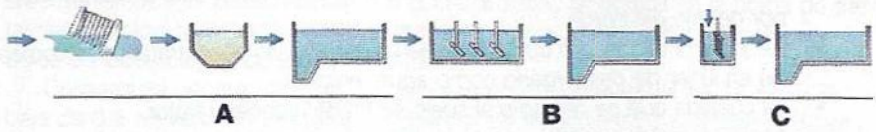
El vertido de las aguas residuales está regulado legalmente en muchos paises. El control de los vertidos, por ejemplo, se debe solucionar de forma que el caudal de las aguas residuales se mida y registre continuamente y se han de tomar muestras de una parte alicuota, en proporción al caudal.

La Figura 22.1 ilustra un sistema de medida del caudal en un canal abierto con un estrechamiento venturi. Para mayor información sobre los estrechamientos venturi y otros sistemas de medida, es interesante contactar con las autoridades municipales relacionadas con el tratamiento y vertido de las aguas residuales. En cuanto al muestreo, en la Figura 22.2 se da un ejemplo de procedimiento de muestreo.

Las señales indicadoras del volumen medido de agua en el canal se transmiten a través de una unidad de control al dispositivo de muestreo. Se muestrea un volumen alícuota de caudal siempre que un volumen predeterminado de agua (por ejemplo 100 l) haya pasado por el transmisor de caudal. Las muestras diarias se mezclan, y después de un período opcional se analiza un volumen más pequeño de las muestras mezcladas.

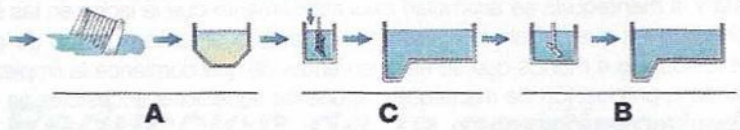
Tratamiento de las aguas residuales

Son posibles varias soluciones; la elección del tratamiento viene determinada por el grado requerido de reducción de la carga contaminante. La Figura 22.3 muestra cuatro sistemas posibles.



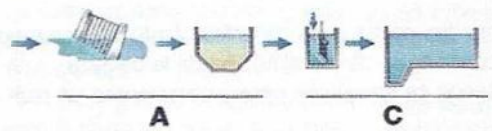
1. Post-precipitación

Proceso convencional de tres etapas con tratamiento mecánico, A, biológico, B, y químico, C. Efectivo y fiable, pero relativamente caro.



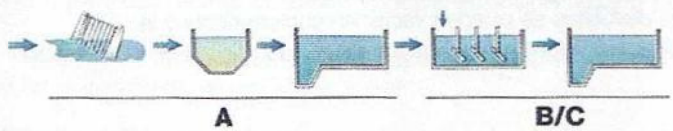
2. Pre-precipitación

Es un proceso en dos etapas desarrollado en los años ochenta. El tratamiento químico, C, se combina con la sedimentación mecánica. A, en la primera etapa, obteniendo como resultado una gran reducción de fósforo así como alrededor del 70% de reducción de la DBO. Esto alivia la carga de la etapa biológica, B, que entonces requiere mucho menos volumen de balsa y menos entrada de energía que con un sistema convencional de post-sedimentación.



3. Precipitación directa

Es un proceso de una etapa, que combina el tratamiento mecánico, A, y químico, C, como en la precipitación, pero sin una etapa posterior de tratamiento biológico.



4. Precipitación simultánea

Es un proceso de dos etapas con tratamiento mecánico, A, seguido de una etapa combinada biológica/química, B/C. Es un método relativamente barato que satisface la demanda de reducción de fósforo sin capacidad adicional de la balsa, pero es menos eficiente que si el tratamiento biológico y químico se realizan por separado.

Fig. 22.3 *Las distintas etapas de tratamiento de las aguas residuales se pueden combinar de diversas maneras.*

En principio, el tratamiento de las aguas residuales consiste simplemente en la eliminación de las impurezas sólidas groseras mediante sedimentación mecánica (A). Cuando este tratamiento se juzgue insuficiente, debe suplementarse con un tratamiento biológico (B) para degradar los compuestos orgánicos.

Muchas plantas de tratamiento de aguas residuales ultimamente se han ampliado con una tercera etapa de tratamiento químico cuando la emisión de fósforo sea un problema serio. El proceso en las plantas de este tipo se denomina post-precipitación porque el paso de precipitación química se realiza en último lugar.

Sin embargo, las últimas experiencias han demostrado que es posible obtener el mismo resultado si la precipitación química se combina con un tratamiento mecánico en la primera etapa. Este sistema se denomina pre-precipitación (ver la Figura 22.3.2).

Esta solución también representa una mayor racionalización del proceso, ya que la mayor parte del tratamiento de las aguas residuales se hace en un paso. El contenido de fósforo se reduce así en un 90% y la DBO en un 75% en las balsas de pre-sedimentación. Como resultado de lo anterior, la etapa de tratamiento bio-

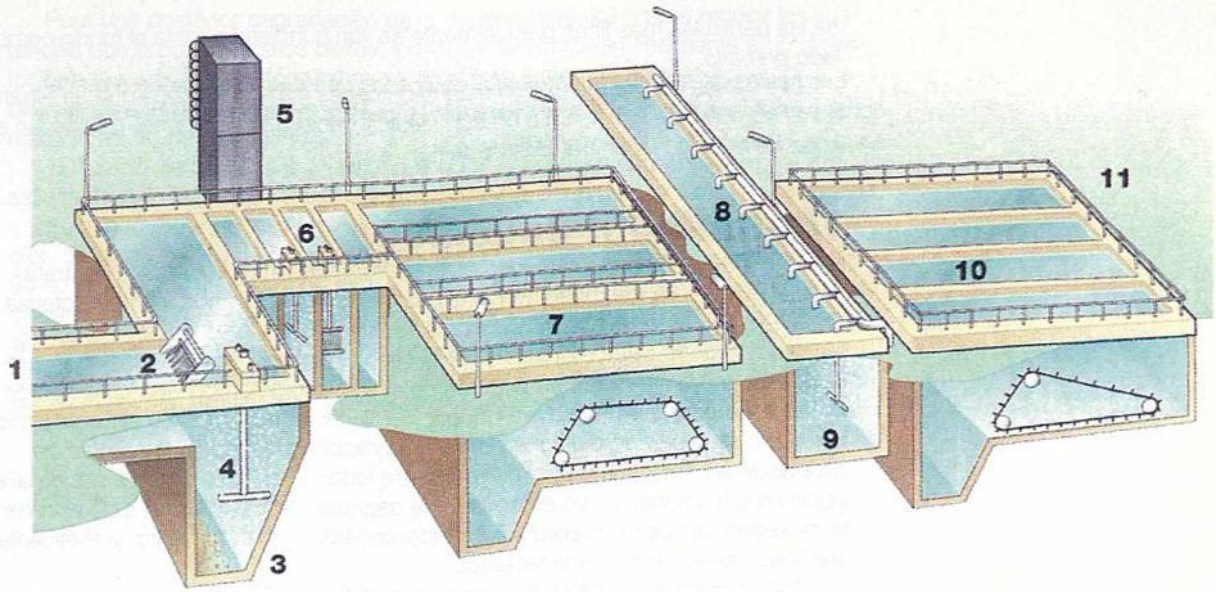


Fig. 22.4 *Etapas de una planta de tratamiento de aguas residuales.*
1. *Canal de entrada*
2. *Rejilla o tamiz grosero*
3. *Desarenado*
4. *Aireación*
5. *Silo para el floculante*
6. *Pre-precipitación*
7. *Pre-sedimentación*
8. *Tratamiento biológico*
9. *Aireación*
10. *Post-sedimentación*
11. *Efluente clarificado para vertido*

lógico afronta una carga más ligera y requiere, por tanto, una balsa de menos volumen y menos consumo energético.

Tratamiento mecánico

La primera etapa (mecánica) de tratamiento de las aguas residuales comprende un tamizado, un desarenado y unas balsas de sedimentación primaria.

El tamiz retiene las materias sólidas gruesas: plásticos, trapos, residuos de alimentos, etc. Estos materiales se eliminan continuamente de la rejilla o tamiz y se eliminan por separado, normalmente se utilizan como material de relleno de tierras.

El *desarenador* es una balsa en la que tiene lugar la separación de gruesos. Se dimensiona y se opera de tal manera que la arena y otras partículas pesadas tienen tiempo de caer al fondo, mientras que la grasa y otras impurezas que son más ligeras que el agua flotan en la superficie. El sedimento se extrae por bombeo, mientras que el flotante se elimina mediante palas de arrastre. Estos residuos se eliminan por separado.

Se inyecta aire en el desarenador en parte para mantener las partículas más finas en suspensión y en parte para prevenir que comiencen los procesos de putrefacción que causan malos olores.

Tratamiento químico

El objetivo principal del tratamiento químico de las aguas residuales, también conocido como precipitación, es eliminar el fósforo del agua. Los sistemas municipales de tratamiento de aguas residuales normalmente recogen unos 2.5 - 4 gramos de fósforo por persona y día, sobre todo en forma de fosfatos. Los detergentes suponen alrededor del 30% del contenido de fosfatos; el 70% restante procede fundamentalmente de los excrementos humanos y de los residuos de alimentos.

La precipitación química con floculantes a base de hierro y aluminio pueden eliminar casi el 100% del fósforo presente en las aguas residuales, mientras que el tratamiento biológico convencional sólo reduce el contenido en fósforo en un 20-30%.

La etapa de precipitación comienza en los *tanques de floculación*, donde se añaden los floculantes y se mezclan vigorosamente en el agua con agitadores. Esto da lugar a una precipitación de fosfatos insolubles, inicialmente en forma de partículas muy finas que, sin embargo, gradualmente se agregan en flóculos más grandes. Los flóculos se precipitan en *balsas de pre-sedimentación*, desde donde sale el sobrenadante claro del efluente para sufrir a continuación el tratamiento biológico.

La *pre-sedimentación* es la etapa final del tratamiento combinado mecánico y químico. Se le permite fluir al agua lentamente a través de una o más balsas don-

de las partículas más finas gradualmente se van hundiendo hasta el fondo como *lodo primario*.

Las balsas de sedimentación están equipadas con dispositivos que arrastran continuamente el sedimento a un sumidero, y canales transversales que sacan el agua de la capa superficial clarificada.

Tratamiento biológico

Las impurezas orgánicas remanentes en el sobrenadante procedente del tratamiento químico se degradan con la ayuda de microorganismos, como bacterias, que se alimentan de las sustancias orgánicas presentes en el agua.

Los microorganismos deben tener acceso al oxígeno para desarrollar su función. Este es suministrado en la forma de aire inyectado en la *balsa de aireación*.

Los microorganismos se reproducen continuamente, formando un *lodo activo*. Este lodo es separado del agua porque se precipita al fondo en las *balsas de post-sedimentación*. La mayor parte de este lodo se recircula a las balsas de aireación para mantener activo el proceso de degradación biológica; el lodo excedente se separa del proceso para sufrir posteriormente otro tratamiento, y el efluente clarificado se vierte al cauce receptor.

Una alternativa a la balsa de aireación es el *filtro biológico*, que es un envase lleno de piezas de piedra o plástico. El agua se rocía sobre el filtro por medio de un distribuidor rotatorio, y gotea a través del lecho del filtro, siendo oxigenado mediante circulación de aire. Sobre las superficies de las piedras se forma una "piel" de microorganismos, que degradan las impurezas orgánicas del agua.

Tratamiento de los lodos

El lodo procedente de las distintas etapas de tratamiento se recoge en tanques de espesamiento a los que se añade agentes químicos para facilitar una posterior agregación de las partículas sólidas.

Balsas de sedimentación primaria
100 m^3 de lodos de las balsas de sedimentación primaria.
SS 2%
Contenido de agua 98%.

Espesador de lodos
Se eliminan 66 m^3 de agua en el espesador de lodos.
34m^3 de lodos con un 6% de SS continuan a la planta de centrifugación.

Decantadora
Se eliminan 26 m^3 de agua en la decantadora centrífuga.
Se descargan 8 m^3 de lodos separados del agua con 25% de SS. La reducción de volumen en la etapa centrífuga es del 76%.

SS = Sustancias secas.

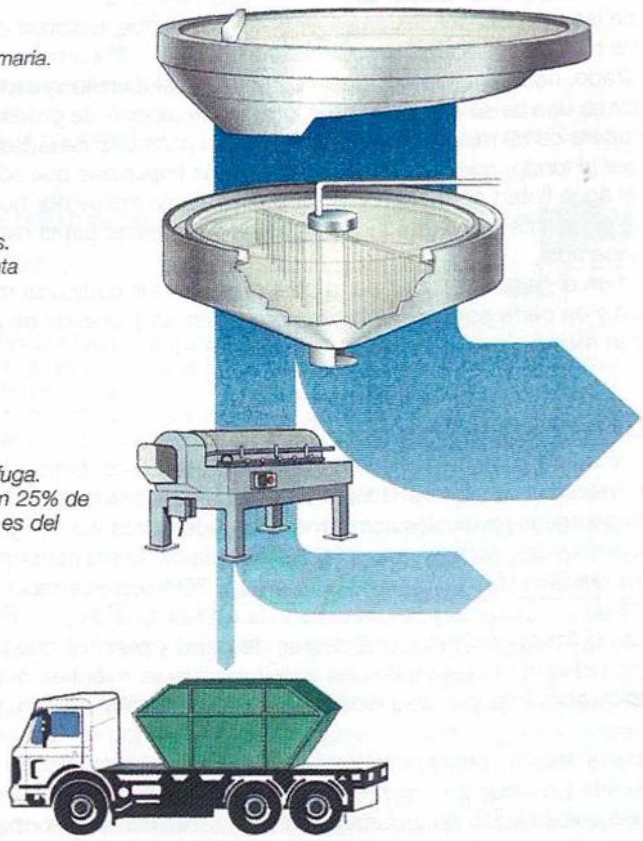


Fig. 22.5 *Reducción en volumen de los lodos o fangos húmedos procedentes de la etapa de sedimentación primaria tras el tratamiento en un espesador de lodos y en una decantadora centrífuga. La cantidad de lodos separados del agua descargados de la decantadora centrífuga es sólo el 8% del volumen de los lodos húmedos procedentes de las balsas de sedimentación.*

Para una posterior degradación de la materia orgánica y para reducir las sustancias que producen malos olores, los lodos se bombean finalmente a un digestor donde las sustancias orgánicas se degradan (bajo condiciones anaeróbias) a dióxido de carbono y metano y muy pequeñas cantidades de gas hidrógeno, amoniaco y sulfuro de hidrógeno.

El dióxido de carbono y el metano son los principales componentes del gas saliente del digestor, que se pueden utilizar como combustible para calentamiento.

El lodo saliente del digestor es una sustancia homogénea, prácticamente sin olor, de color oscuro, pero que aún tiene un contenido elevado de humedad, del 94-97%. A continuación, gran parte del agua se separa del lodo de forma muy efectiva en una decantadora centrífuga, que descarga una fase sólida que supone la octava parte del volumen original, tal como se muestra en la Figura 22.5.

El lodo bastante deshidratado se puede utilizar como fertilizante o como material de relleno de tierras, o simplemente puede ser vertido como residuo.

Literatura

La bibliografía que se relaciona a continuación puede servir como guía para obtener información más detallada acerca del procesado de la leche y de la tecnología de obtención de los productos lácteos.

Dictionary of Dairy Technology
English, French, German, Spanish, compiled by International Dairy Federation (IDF), Brussels, Belgium
Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam/Oxford/New York, 1983

A Dictionary of Dairying
by J.G. Davis
Leonard Hill, London, UK

Fundamentals of Dairy Chemistry
Editied by B.H. Webb and A.H Johnson
The AVI Publishing Company Inc., Westport, Connecticut, USA

Developments in Dairy Chemistry, Volume 1 – 4
by P.F. Fox
Applied Science Publishers, London and New York

The Milk Fat Globule
by H. Mulder and A. Walstra
Commonwelth Agricultural Bureaux, Farnham Royal and Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen, the Netherlands, 1974

Lebensmittel- und Bioverfahrenstechnik Molkereitechnologie
by H.G. Kessler
Verlag A. Kessler, Postfach 1538, D-8050 Freising, Germany

Cheese Chemistry, Physics and Microbiology, Volume I and II
by P.F. Fox
Applied Science Publishers, London and New York

Cheese and Fermented Milk Foods
by Frank Kosikowski
F.V. Kosikowski and Associates, P.O. Box 139, Brooktondale, New York 14817-0139, USA

Handbuch der Käse
by Dr Heinrich Mair-Waldberg
Volkwirtschaftlicher Verlag GmbH, Kempten, (Allgäu), Germany

Evaporation, Membrane Filtration and Spray Drying in Milk Powder and Cheese Production
Technical Food and Dairy Publishing House, 105 46 Stockholm, Sweden

Recombination of Milk and Milk Products,
FIL-IDF Bulletin, Document 142, 1982
Secretarial General, 41 Square Vergote, 1040 Brussels, Belgium

Residues and Contaminants in Milk and Milk Products
by International Dairy Federation (IDF)
Secretarial General, 41 Square Vergote, 1040 Brussels, Belgium

Índice

Capítulo 1
La producción de leche 1

Leche de vaca 2
Secreción de leche 3
El ciclo de lactación 4
Ordeño 4
Ordeño manual 4
Ordeño mecánico 5
Enfriamiento de la leche en la granja 6
Equipos de frío en la granja 6
Limpieza y desinfección 7
Frecuencia de entregas a la industria 7
Leche de oveja 8
Rendimiento y período de lactación 8
Tamaño del rebaño 8
Secreción de la leche 8
Grasa de la leche 9
Proteina 9
Algunas propiedades de la leche de oveja 9
Ordeño 9
Ordeño a mano 9
Ordeño mecánico 9
Enfriamiento de la leche 11
Limpieza y desinfección 11
Leche de cabra 12
Rendimiento y período de lactación 12
Secreción de leche 12
Ordeño 12
Ordeño a mano 12
Ordeño mecánico, enfriamiento y almacenamiento 12

Capítulo 2
Química de la leche 13

Conceptos básicos de química 14
Atomos 14
Iones 14
Moléculas 14
Propiedades fisicoquímicas básicas de la leche de vaca 15
Definiciones 15
Acidez de las soluciones 16
pH 16
Neutralización 16
Difusión 16
Osmosis 17
Osmosis inversa 17
Diálisis 17
Composición de la leche de vaca 18
La grasa de la leche 18
Estructura química de la grasa de la leche 18
Punto de fusión de la grasa 19
Indice de iodo 19
Indice de refracción 20
Resonancia Magnética Nuclear (RMN) 20
Cristalización de la grasa 20
Las proteinas de la leche 21
Aminoácidos 21
Estatus eléctrico de las proteinas de la leche 22
Clases de proteinas lácteas 23
Caseina 23
Micelas de caseina 24
Precipitación de la caseina 25
Precipitación por ácido 25
Precipitación por enzimas 26
Proteinas del suero de la leche (Seroproteinas) 26
α-lactoalbúmina 26
β-lactoglobulina 27
Inmunoglobulinas y proteinas relacionadas 27
Proteinas de la membrana del glóbulo graso 27
Proteinas desnaturalizadas 27
La leche es una solución tampón 28
Enzimas de la leche 28
Peroxidasa 28
Catalasa 29
Fosfatasa 29
Lipasa 29
Lactosa 29
Vitaminas de la leche 30
Minerales y sales en la leche 31
Otros constituyentes de la leche 31
Cambios en la leche y en sus componentes 31
Cambios durante el almacenamiento 31
Oxidación de la grasa 31
Oxidación de las proteinas 32
Lipolisis 32
Efectos del tratamiento térmico 32
Grasa 32
Proteinas 33
Enzimas 34
Lactosa 34
Vitaminas 34
Sales minerales 34
Propiedades físicas de la leche 34
Apariencia 34
Densidad 34
Presión osmótica 35
Punto de congelación 35
Acidez 35
Acidez titulable 36
Calostros 36

Capítulo 3
Reología 37

Definición 38
Caracterización de materiales 38
Deslizamiento de capas de producto, esfuerzo cortante y gradiente de velocidad 39
Fluidos Newtonianos 39
Fluidos no-Newtonianos 40
Comportamiento al flujo de los fluidos pseudoplásticos 40
Comportamiento al flujo de los fluidos dilatantes 40
Comportamiento al flujo de los fluidos plásticos 40
Comportamiento al flujo tixotrópico 41
Comportamiento al flujo reopéctico 41

Comportamiento al flujo anti-tixotrópico 41
Modelos de comportamiento al flujo 41
Ecuación o ley de la potencia 41
Datos usuales 42
Equipos de medida 42
Técnicas de medida 43
Cálculos de pérdida de carga 43
Conductos de sección circular 44
Conductos de sección rectangular 44

Capítulo 4
Microorganismos 45
Algunos hitos de la historia de la microbiología 45
Clasificación de los microorganismos 46
Biotecnología 46
Bacterias 47
Morfología de las bacterias 47
Forma de las bacterias 47
Tamaño de las bacterias 47
Estructura celular de las bacterias 47
Movilidad de las bacterias 48
Formación de esporas y formación de cápsulas 48
Condiciones para el crecimiento de las bacterias 48
Nutrientes 48
Paso de materia a través de la membrana citoplasmática 49
Temperatura 49
Clasificación por temperaturas óptimas 50
Humedad 50
Oxígeno 50
La luz 51
Presión osmótica 51
pH-acidez/alcalinidad 51
Reproducción de las bacterias 51
Velocidad de reproducción 51
Curva de crecimiento de las bacterias 51
Actividad bioquímica 52
Descomposición de los hidratos de carbono 52
Descomposición de las proteínas 53
Descomposición de la grasa 53
Descomposición de la lecitina 53
Producción de color y pigmentos 54
Producción de mucílagos 54
Produccion de olores 54
Poder reductor 54
Producción de enfermedades (Toxinas) 54
Recuento de bacterias 54
Identificación y clasificación de las bacterias 55
Las bacterias en la leche 55
Infecciones en la granja 55
Recuento de bacterias en la leche 56
Principales bacterias en la leche 56
Bacterias acidolácticas 56
Bacterias coliformes 57
Bacterias formadoras de ácido butírico 58
Bacterias formadoras de ácido propiónico 58
Bacterias de la putrefacción 59
Los hongos 59
Las levaduras 59
Reproducción de las levaduras 59
Condiciones para el crecimiento de las levaduras 60
Nutrientes 60
Humedad 60
Acidez 60
Temperatura 60
Oxígeno 60
Clasificación de las levaduras 60
Importancia de las levaduras 61
Los mohos 61
Reproducción de los mohos 61
Metabolismo de los mohos 61
Factores externos que afectan el crecimiento de los mohos 61
Humedad 61
Actividad de agua (a_w) 61
Oxígeno 61
Temperatura 62
Acidez 62
Importancia de los hongos en la industria láctea 62
Penicillium 62
El moho de la leche 62
Bacteriófagos 62
Estructura de los bacteriófagos 62
Reproducción de los fagos 62
Conclusiones 63

Capítulo 5
Recogida y recepción de la leche 65
Mantenimiento de la leche fría 66
Diseño de las instalaciones de la granja lechera 66
Entrega a la industria 66
Recogida en cántaras 67
Recogida en cisternas 67
Control de calidad de la leche 68
Sabor y olor 68
Pruebas de limpieza 68
Pruebas de sedimentos 68
Prueba de higiene o de la resazurina 68
Recuento de células somáticas 68
Recuento de bacterias 68
Contenido en proteinas 69
Contenido en grasa 69
Punto de congelación 69
Recepción de la leche 69
Recepción en cántaras 69
Recepción en cisternas 69
Medida por volumen 70
Medida por peso 70
Limpieza de la cisterna 71
Enfriamiento de la leche recibida 71
Almacenamiento de la leche cruda 71
Agitación en los depósitos de almacenamiento 71
Indicación de temperatura en los tanques 72
Indicador de nivel 72
Protección de nivel bajo 72
Protección contra el rebose del depósito 72
Indicación de tanque vacío 72

Capítulo 6
Bloques que integran los sistemas de procesado de la leche 73

6.1 Intercambiadores de calor 75
Objetivos del tratamiento térmico 75
Combinación tiempo/temperatura 76
Factores limitantes del tratamiento térmico 76
Termización 76
Pasteurización LTLT 77
Pasteurización HTST 77
Leche 77
Nata y productos fermentados 77
Ultra pasteurización 77
Tratamiento UHT 78
Esterilización 78
Precalentamiento 78
Procesos de transferencia de calor en la industria láctea 78
Calentamiento 78
Enfriamiento 78
Calentamiento y enfriamiento regenerativos 79
Teoría de la transferencia de calor 79
Principios de la transferencia de calor 79
Calentamiento directo 79
Calentamiento indirecto 80
El intercambiador de calor 80
Datos necesarios para el dimensionado de un intercambiador de calor 80
Caudal de producto 81
Propiedades físicas de los líquidos 81
Programa de temperaturas 81
Cambio de temperatura 81
Diferencia de temperatura media logarítmica (DTML) 81
Flujo a contracorriente 82
Flujo paralelo 82
Coeficiente global de transmisión de calor 82
Pérdidas de carga admisibles 82
Viscosidad 83
Forma y espesor de la pared de intercambio 83
Material de construcción de la pared de intercambio 83
Presencia de suciedad depositada en las superficies de intercambio 83
Necesidades de limpieza 84
Necesidades de tiempo de funcionamiento 84
Regeneración 85
Mantenimiento 85
Cálculo del tiempo de mantenimiento 85
Tipos de intercambiadores de calor 86
Intercambiadores de calor de placas 86
Tipos de flujo 87
Intercambiadores de calor tubulares 87
Multi/mono canal 87
Multi/mono tubo 88
Intercambiador de calor de superficie rascada 88

6.2 Separadoras centrífugas y normalización de la grasa de la leche 91
Separadoras centrífugas 91
Algunos datos históricos 91
Sedimentación por gravedad 92
Condiciones para la sedimentación 92
¿Cómo tiene lugar la sedimentacion? 92
Densidad 92
Velocidad de flotación y sedimentación 93
Velocidad de flotación de un glóbulo graso 93
Separación discontínua por gravedad 93
Separación continua por gravedad 94
Utilización de pantallas para incrementar la capacidad de separación de un depósito 94
Separación continua de una fase sólida y de dos fases líquidas 95
Separación por centrifugación 95
Velocidad de sedimentación 95
Velocidad de flotación de un glóbulo de grasa 96
Separación continua por centrifugación de partículas sólidas - Clarificación 96
Canales de separación 96
La partícula límite 97
Separación centrífuga continua de la leche 97
Clarificación 97
Separación 97
Eficiencia en el desnatado 98
Contenido graso de la nata 98
Expulsión de los sólidos 98
Diseño básico de las desnatadoras centrífugas 99
Diseño semiabierto 99
Disco centrípeto 99
Diseño hermético 100
Control del contenido en grasa de la nata 101
Separadora de disco centrípeto 101
Caudalímetros para la nata 101
Separadoras herméticas 101
Diferencias de comportamiento en las salidas de las separadoras de discos centrípetos y herméticas 102
El sistema de descarga 102
Producción y limpieza CIP 102
Descarga 103
Unidades motoras 103
Normalización del contenido en grasa de la leche y la nata 104
Métodos de cálculo de mezclas de productos 104
Principio de la normalización 104
Normalización directa automática 105
Sistema de control del contenido en grasa de la nata 106
Control en cascada 106
Control del contenido graso por medio de la medida de la densidad 107
Transmisor de caudal 108
Valvula de regulación de caudal para nata y leche desnatada 108
Circuito de control del mezclado de la nata 108
El proceso completo de normalización directa 109
Algunas opciones para la normalización de la grasa
La Bactofugadora® 110
Decantadoras centrífugas 111
Función de la decantadora centrífuga 111
Descarga de los sólidos 112
Descarga del líquido abierta 112

Descarga presurizada del líquido 112
Proceso contínuo 112
Componentes principales 112
Rotor 113
Transportador 113
Caja de transmisión 113
Bastidor y carcasa 113

6.3 Homogeneizadores 115
Tecnología de la disrupción de los glóbulos de grasa 115
Necesidades de proceso 115
Características de flujo 116
Teorías de la homogeneización 116
Homogeneización en simple y en doble etapa 116
Efecto de la homogeneización 117
El homogeneizador 117
La bomba de alta presión 117
El cabezal de homogeneización 118
Eficiencia de la homogeneización 119
Métodos analíticos 119
Estudios de velocidad de formación de capa de nata 119
Análisis de la distribución de tamaños 119
Consumo de energía e influencia de la temperatura 120
El homogeneizador en una linea de proceso 121
Homogeneización total 121
Homogeneización parcial 122
Aspectos relacionados con la salud de los productos lácteos homogeneizados 122

6.4 Filtros de membrana 123
Definiciones 123
Tecnología de membranas 123
Principios de separación por membranas 125
Módulos de filtración 126
Diseño de placas y bastidor 126
Diseño tubular - a base de polímeros 126
Diseño tubular - a base de cerámica 126
Diseño enrrollado en espiral 127
Diseño de fibra hueca 128
Límites de separación de las membranas 129
Transporte del material a través de las membranas 129
Condiciones de presión 130
Bases del diseño de una planta de filtración por membranas 130
Producción discontinua 131
Producción continua 131
Temperatura de trabajo en las aplicaciones de la filtración con membranas 132

6.5 Evaporadores 133
Eliminación de agua 133
Evaporación 133
Diseño del evaporador 133
Evaporadores de circulación forzada 134
Evaporadores de película descendente 134
Evaporador de tipo tubular 135
Evaporador de placas 135
Evaporación de efecto múltiple 136
Termocompresión 137
Eficiencia de la evaporación 137
Recompresión mecánica del vapor 138

6.6 Desaireadores 139
Aire y gases en la leche 139
Más aire mezclado 139
Eliminación de aire y recogida de la leche 140
Recepción de la leche 140
Tratamiento por vacío 140
Desaireción en la línea de tratamiento de la leche 141

6.7 Bombas 143
Necesidades de bombeo 143
Línea de aspiración 144
Línea de impulsión 144
Cavitación 144
Curvas características 144
Carga (presión) 145
NPSH (Carga de Succión Positiva Neta) 145
Cierres axiales o Prensaestopas 146
Sello mecánico simple 146
Prensaestopas inundado 146
Material para el prensaestopas 146
Bombas centrífugas 146
Principios de bombeo 146
Aplicaciones de las bombas centrífugas 147
Control de caudal 147
Estrangulamiento 147
Reducción del diámetro del rodete 148
Control de velocidad 148
Bombas para 60 Hz 148
Carga y presión 148
Densidad 148
Viscosidad 149
Bombas de anillo líquido 149
Aplicaciones 149
Bombas de desplazamiento positivo 149
Principio de funcionamiento 149
Control de caudal 150
Diámetro y longitud de la tubería 150
Bombas de rotor lobulado 150
Aplicaciones 150
Bombas de tornillo excéntrico 151
Bombas de pistón 151
Bombas de diafragma 151
Principio de trabajo 151
Bombas peristálticas 151

6.8 Tuberías, válvulas y accesorios 153
La red de tuberías 153
Conexiones 153
Accesorios especiales para las tuberias 154
Dispositivos para la toma de muestras 154
Válvulas 154
Sistemas de cierre estanco 154
Válvulas de cierre y válvulas de desviación de flujo 155
Válvulas de asiento 155
Válvulas de mariposa 156
Control manual 156

Control automático 156
Válvulas estancas 157
Indicación de posición y control 158
Sólo indicación de posición 158
Control más moderno 158
Válvulas antirretorno 158
Válvulas de control 158
Sistemas de válvulas 160
Soportes para tuberías 160

6.9 Tanques 161
Tanques de almacenamiento 161
Tanques silo 161
Depósitos intermedios de almacenamiento 162
Depósitos de mezcla 162
Tanques de proceso 162
Tanque de regulación 162

6.10 Control de proceso 165
Automatización 165
¿Qué es la automatización? 165
Lógica 166
¿Por qué es necesario el control automático de los procesos? 166
¿Cuáles son las tareas de control? 167
Control digital 167
Control analógico 168
Monitorización/supervisión 168
Información de gestión 168
¿Qué decide el nivel de automatización? 169
Funciones del operador 169
Pantalla gráfica 169
Terminal de impresión 169
Unidades locales de operador 170
Funcionamiento del sistema de control 170
El sistema de control programable 171
Exigencias del sistema de control 171
Ampliación del sistema de control 171
Lenguajes simples de programación 171
Soluciones electrónicas eficaces 172
Ejemplos de sistemas de control 172
El pequeño controlador PLC 172
Control descentralizado del proceso 173
Control integrado total de la planta 173

6.11 Sistemas auxiliares 175
Necesidades en la elaboración de productos lácteos 175
Equipamiento de abastecimiento de agua 175
Tratamiento del agua 176
Diseño de la red de tuberías 177
Producción de calor 177
Producción de vapor 178
Calderas de vapor 179
Separación y retorno de los condensados 179
Otros equipos 179
La red de distribución de vapor 180
Refrigeración 180
Principios de la refrigeración 180
¿Cómo trabaja el sistema frigorífico? 181
El evaporador 181
El compresor 182
El condensador 182
Otros equipos 183
Producción de aire comprimido 183
Requisitos que debe cumplir el aire comprimido 184
Instalación de aire comprimido 184
Secado del aire 185
Red de tuberías de distribución 186
Potencia eléctrica 186
Instalación de acometida en alta tensión 186
Transformador de potencia 187
Cuadro general de distribución en baja tensión 187
Grupo autogenerador 187
Cuadros secundarios de fuerza, CSF 187

Capítulo 7
Diseño de una línea de proceso 189
Consideraciones sobre el diseño de procesos 190
Algunas exigencias legales 190
Equipamiento requerido 191
Selección de equipos 191
Tanques silo 191
Intercambiador de calor de placas 192
Sistemas de calentamiento con agua 192
Control de temperatura 193
Mantenimiento 193
Control de la pasteurización 193
Sistema de enfriamiento del pasteurizador 193
Bomba de refuerzo para prevenir la reinfección 194
El pasteurizador completo 194
Tanque de regulación 194
Bomba de alimentación 195
Controlador de caudal 195
Precalentamiento regenerativo 195
Pasteurización 195
Desvío de flujo 195
Enfriamiento 196
Clarificadora centrífuga 196
Diseño de la red de tuberías 196
Flujos laminar y turbulento 196
Resistencia al flujo 196
Caida de presión 197
Equipamiento de control de proceso 198
Transmisores 198
Controladores 199
El dispositivo de regulación 200
Control automático de la temperatura 200

Capítulo 8
Productos lácteos pasteurizados 201
Procesado de la leche pasteurizada para consumo 202
Normalización 204
Pasteurización 204
Homogeneización 204
Determinación de la eficacia de la homogeneización 205
Mantenimiento de la calidad de la leche pasteurizada 205
Vida útil de la leche pasteurizada 206
Leche "ESL" 207

Producción de nata 207
Nata para montar 207
El método de batido 208
La línea de producción de nata montada 209
El método Scania 209
Nata ligera 211
Envasado 213

Capítulo 9
Leche de larga duración 215
Calidad de la materia prima 216
Eficiencia de la esterilización 216
Reducción logarítmica de esporas 216
Valor Q_{10} 217
Valor F_0 218
Valores B* y C* 218
"La partícula más rápida" 218
Esterilidad comercial 219
Cambios químicos y bacteriológicos en un tratamiento térmico intenso 219
Vida útil 220
Aspectos nutricionales 220
Producción de leche de larga duración 221
Esterilización del producto envasado 221
Procesado discontinuo 222
Procesado continuo 222
Esterilizador hidrostático vertical 222
Esterilizador horizontal 223
Tratamiento UHT 223
El proceso UHT 223
Desarrollo del sistema UHT 224
Plantas UHT 224
Sistemas de tratamiento UHT 224
Fases generales de operación del sistema UHT 225
Pre-esterilización 225
Producción 225
Limpieza aséptica intermedia 225
CIP 225
Planta UHT de tratamiento directo basada en la inyección de vapor y con intercambiador de calor de placas 225
Planta UHT de tratamiento directo basada en la inyección de vapor y con intercambiador de calor tubular 226
Planta UHT de tratamiento directo con infusión de vapor 227
Planta UHT de tratamiento indirecto con intercambiadores de calor de placas 227
Calentamiento en dos etapas (o calentamiento dividido) 228
Planta UHT de tratamiento indirecto con intercambiadores de calor tubulares 229
Planta UHT de tratamiento indirecto con intercambiadores de calor de superficie rascada 229
Tanque aséptico 230
Envasado aséptico 231
Plantas piloto de tratamiento UHT 231

Capítulo 10
Preparación de cultivos y starters 233
Etapas de propagación 235
Tecnología del proceso 236
Las etapas del proceso 236
Tratamiento térmico del sustrato 237
Enfriamiento hasta la temperatura de inoculacion 237
Inoculación (siembra) 237
Incubación 237
Enfriamiento del cultivo 238
Conservación de los fermentos 238
Preparación de fermentos en condiciones asépticas 239
Tanques de cultivo industrial 240

Capítulo 11
Productos lácteos acidificados 241
La leyenda 242
Necesidades generales de la producción de leches acidificadas 242
Yogur 243
Yogur con aromas o frutas 243
Factores que afectan la calidad del yogur 244
Elección de la leche 244
Normalización de la leche 244
Grasa 244
Contenido en materia seca (MS) 244
Aditivos en la leche 245
Azúcar o edulcorantes 245
Sustancias estabilizantes 245
Desaireación 245
Homogeneización 246
Tratamiento térmico 246
Elección del fermento 246
Preparación del cultivo 247
Diseño de la planta 247
Líneas de producción 247
Evaporación 247
Homogeneización 248
Pasteurización 248
Enfriamiento de la leche 249
Diseño de la planta de yogur 249
Yogur batido 249
Enfriamiento del gel 250
Aromatización del yogur 250
Envasado 251
Diseño de la planta 251
Yogur de tipo firme 251
Aromatización/Envasado 252
Un sistema alternativo de producción 252
Aromatización/envasado 252
Incubación y enfriamiento 253
Incubación 253
Enfriamiento 253
Yogur líquido 254
Yogur de larga duración 254
Producción en condiciones asépticas 254
Condiciones de producción con "Salas Blancas" 255
Tratamiento térmico del yogur 255
Yogur congelado 255

Producción del mix de yogur 256
Yogur congelado endurecido 257
Distribución 257
Yogur concentrado 257
Kefir 257
Materias primas 258
Producción del cultivo iniciador 258
Producción de kefir 259
Normalización de la grasa 259
Homogeneización 259
Tratamiento térmico 259
Inoculación 259
Incubación 259
Etapa de acidificación 259
Etapa de maduración 259
Enfriamiento 259
Otra manera de producir kefir 259
Nata acidificada 260
Producción 260
Homogeneización 260
Tratamiento térmico 260
Inoculación y envasado 260
La mazada 261
Mazada fermentada 261
Recientes desarrollos en productos lácteos acidificados
"Las bacterias acidolácticas - ¿vacunas del futuro?" 261

Capítulo 12
Mantequilla y productos lácteos para untar 263
Definiciones 263
Mantequilla 265
Mantequilla dulce y mantequilla ácida 266
Producción de mantequilla 266
La materia prima 268
Pasteurización 268
Desaireación al vacío 269
Acidificación bacteriana (maduración) 269
Preparación del cultivo 269
Acidificación de la nata 270
Tratamiento térmico 270
Cristalización de la grasa láctea 270
Tratamiento de la grasa dura 271
Tratamiento de la grasa semidura 272
Tratamiento de la grasa muy blanda 272
Batido 272
Producción discontinua 272
Formación de la mantequilla 272
Eficacia del batido 273
Amasado 273
Amasado al vacío 273
Producción continua de mantequilla 273
El proceso de fabricación 273
Nuevas tendencias y expectativas en productos para untar Bregott 275
Lätt & Lagom 275
Proceso TetraBlend™ 275
Línea de proceso 276
Empaquetado 277
Almacenamiento frigorífico 277
Métodos experimentales de fabricación de mantequilla 277

Capítulo 13
Grasa láctea anhidra. Aceite de mantequilla. 279
Características de la GLA 280
Producción de la GLA 281
Principios de producción 281
Fabricación de la GLA a partir de nata 281
Fabricación de GLA a partir de mantequilla 282
Refinado de la GLA 283
Abrillantado 284
Neutralización 284
Fraccionamiento 284
Decolesterolización 285
Envasado 285

Capítulo 14
El queso 287
Tradición y conocimientos básicos 287
Terminología en la clasificación de los quesos 288
Definiciones 288
Clasificación de los quesos 288
Fabricación del queso. Procedimientos generales de fabricación del queso duro y semiduro 289
Tratamientos previos de la leche 290
Recogida de la leche 291
Tratamiento térmico y reducción mecánica del número de bacterias 291
Termización 291
Pasteurización 292
Reducción mecánica del número de bacterias 292
Bactofugación 292
Alternativas de proceso 293
Microfiltración 295
Normalización 296
Aditivos en la leche para fabricación de queso 296
Fermentos 296
Fallos de los cultivos 297
Cloruro cálcico (Cl_2Ca) 297
Dióxido de carbono (CO_2) 297
Nitrato potásico o sódico 298
Agentes colorantes 298
Cuajo 298
Sustitutos del cuajo animal 299
Otros sistemas enzimáticos 299
Tipos de fabricación del queso 299
Producción de la cuajada 299
Tratamiento de la leche 299
Adición del fermento 300
Aditivos y cuajado 300
Corte del coágulo 301
Pre-agitación 301
Pre-drenaje de suero 302
Calentamiento/cocción/escaldado 302
Agitación final 303
Eliminación final de suero y principios de manejo de la cuajada 303

Queso con textura granular 303
Queso de ojos redondeados 303
Tinas de pre-prensado 304
Sistema de pre-prensado continuo 304
Quesos de textura cerrada 305
Fabricación mecanizada del queso Cheddar 306
Tratamiento final de la cuajada 307
Prensado 307
Prensado en mesa 307
Prensa de túnel autoalimentada (prensa Autofeed) 307
Prensa de cinta 308
Sistema formador de bloques 308
Cocción y estirado de los tipos de queso de Pasta Filata 308
Moldeo 309
Salado 309
Métodos de salado 309
Salado en seco 309
Salado con salmuera 310
Salado superficial o poco profundo 310
Salado profundo 311
Sistema de salado en bastidor 311
Algunas notas acerca de la preparación de la salmuera 312
Penetración de sal en el queso 312
Tratamiento de la salmuera 313
Maduración y almacenamiento del queso 313
Maduración (curado) 313
Descomposición de la lactosa 314
Descomposición de proteinas 314
Almacenamiento 314
Condiciones de almacenamiento 315
Métodos de acondicionamiento de aire 315
Distribución en la cámara y necesidades de espacio 316
Líneas de proceso para los quesos duros y semiduros 316
Tipos de queso duro 317
Línea de proceso para el queso Emmenthal 317
Línea de proceso para el queso Cheddar 318
Tipos de queso semiduro 318
Línea de proceso para el queso Gouda 318
Línea de proceso para queso Tilsiter 319
Línea de proceso para el queso Mozzarella 320
Tipos de queso semiduro, semiblando y blando 321
Queso semiduro y semiblando 321
Queso azul veteado 321
Queso semiblando/blando 323
Queso Camembert 323
Queso blando 323
Queso Cottage 323
Quarg 324
Ultrafiltración (UF) en la fabricación de queso 326
Fabricación de queso utilizando UF y la máquina de fabricación de cuajada 327
Nuevas tendencias 328
Quesos fundidos 328
Fabricación de los quesos fundidos 328

Capítulo 15
Procesado del lactosuero 331
Diferentes tratamientos del suero 333
Recuperación de finos de caseina y separación de la grasa 333
Enfriamiento y pasteurización 334
Concentración de los sólidos totales 334
Concentración 334
Secado 334
Fraccionamiento de los sólidos totales 335
Recuperacion de las proteínas 335
Recuperación de proteínas por medio de la ultrafiltración (UF) 335
Desengrasado del concentrado de proteinas de suero (CPS) 337
Recuperación de las proteinas desnaturalizadas del suero 338
Aislamiento cromatográfico de lactoperoxidasa y lactoferrina 339
Recuperación de la lactosa 340
Cristalización 340
Separación de la lactosa 341
Secado 341
Refino de la lactosa 341
Desmineralización (Desalinización) 342
Principios de la desmineralización 342
Desmineralización parcial por NF 342
Desmineralización de alto grado 343
Electrodiálisis 343
Principio de operación 343
Suministro de potencia y automatización 344
Factores limitantes en la electrodiálisis 344
Intercambio iónico 345
Características de la resina de intercambio iónico 346
Procesos de intercambio iónico para desmineralización 347
Intercambio iónico convencional para desmineralización 347
Limitaciones del proceso 348
Un proceso de intercambio iónico alternativo 349
Limitaciones del proceso y costes 350
Conversión de la lactosa 350
Hidrólisis de la lactosa 350
Hidrólisis enzimática 351
Hidrólisis ácida 352
Reacción química 352
Lactosil urea 352
Lactato amónico 352

Capítulo 16
Leches concentradas 353
Notas sobre la leche concentrada 354
Materia prima para la elaboración de leches concentradas 355
Calidad bacteriológica de la materia prima 355
Estabilidad térmica de la materia prima 355
Tratamiento previo 355
Normalización 355
Tratamiento térmico 355
Leche evaporada no azucarada 356
Evaporación 356
Homogeneización 356
Enfriamiento y esterilización de una muestra 356
Enlatado 357
Esterilización 357
Tratamiento UHT 357
Almacenamiento e inspección 357

Leche condensada (leche evaporada azucarada) 357
Evaporación 358
Enfriamiento y cristalización 358
Envasado e inspección 359

Capítulo 17
Leche en polvo 361
El proceso de secado 362
Distintos usos de productos en polvo 362
Leche desnatada en polvo 363
Leche entera en polvo 363
Leche en polvo instantánea 364
Densidad aparente 364
Definición 364
Factores que influyen sobre la densidad aparente 364
Densidad del material pulverulento 364
Contenido de aire ocluido 364
Aire intersticial 365
Producción de leche en polvo 365
Materia prima 365
Tratamientos previos generales de la leche 365
Secado en rodillos o en tambor rotatorio 366
Secado por atomización 366
Instalaciones básicas de secado 367
Secado en una etapa 367
Secado en dos etapas 367
Secado en tres etapas 367
Principio de operación del secado por atomización 367
Secado en una etapa 367
Atomización de la leche 368
Secado en dos etapas 368
Secado en tres etapas 369
Producción de leche en polvo instantánea 371
Secado en lecho fluidizado 371
Recuperación de calor 372
Envasado de la leche en polvo 373
Cambios en la leche en polvo durante su almacenamiento 373
Disolución de la leche en polvo 373

Capítulo 18
Productos lácteos recombinados 375
Definiciones 376
Manejo de materias primas 376
Leche en polvo 376
Grasas y aceites 377
Agua 378
Aditivos 378
Disolución de la leche en polvo 378
Humectabilidad 378
Facilidad de sedimentación 378
Facilidad de dispersión 379
Solubilidad 379
Temperatura de recombinación y tiempo de hidratación 379
Adición de grasa y emulsión 379
Contenido en aire 380
Manejo de los productos en polvo 380
Diseño de plantas de recombinación 380
Desaireación 380
Tratamiento térmico 381
Planta con suministro de grasa a los depósitos de mezcla 381
Producción a pequeña escala 381
Producción a gran escala 381
Planta con sistema continuo de mezcla de grasa 382
Producción a gran escala 382
Manejo de la leche 383
Envasado 383
Almacenamiento 384
Distribución 384

Capítulo 19
Helados 385
Categorías de helados 386
El proceso de fabricación de helados de crema 386
Recepción y almacenamiento de las materias primas 386
Formulación 387
Ingredientes 388
Grasas 388
Sólidos lácteos no grasos (SLNG) 388
Azúcares 388
Emulsionantes 389
Estabilizantes 389
Aromatizantes 389
Colorantes 389
Pesado, dosificación y mezcla 389
Homogeneización y pasteurización 390
Maduración 390
Congelación continua 390
Envasado, extrusión y moldeo 390
Envasado en copas, conos y tarrinas 390
Extrusión de productos con palo y sin palo 391
Moldeo de barras 391
Endurecimiento y conservación del helado 392
Envoltura y empaquetado 392
Ejemplos de plantas de producción 392

Capítulo 20
Caseina 395
Diferentes tipos de caseina 396
Influencia de la materia prima 396
Caseina al cuajo 396
Lavado discontinuo 396
Lavado continuo 397
Caseina ácida 397
Acidificación biológica - caseina acidoláctica 398
Acidificación mineral - caseina ácida 398
Co-precipitado 399
Caseinatos 399
Caseinato sódico 399
Caseinato cálcico 400
Otros caseinatos 400
Caseinato sódico extrusionado 400
Usos de las caseinas y los caseinatos 401
Caseina al cuajo 401
Caseina ácida 401
Caseinato sódico 401

Caseinato cálcico 402
Co-precipitados de calcio 402

Capítulo 21
Limpieza de los equipos 403
Aspectos a tener en cuenta en la limpieza 403
Obligaciones comerciales 404
Obligación moral 404
Obligación legal 404
Objetivos de la limpieza 404
Suciedad 404
Superficies calientes 404
Superfices frias 405
Procedimientos de limpieza 405
Recuperación de producto residual 405
Preenjuagado con agua 406
Limpieza con detergente 406
Concentración de detergente 406
Temperatura del detergente 407
Efectos mecánicos de la limpieza 407
Duración de la limpieza 407
Enjuagado con agua limpia 407
Desinfección 407
Sistemas de limpieza CIP (cleaning-in-place) 408
Circuitos CIP 408
Compatibilidad de los materiales de construcción y diseño del sistema 408
Programas CIP 409
Diseño de los sistemas CIP 410
Sistemas CIP centralizados 410
Sistemas CIP descentralizados 411
Verificación del efecto de limpieza 412

Capítulo 22
Efluentes de las industrias lácteas 415
Contaminantes orgánicos 416
Demanda biológica de oxígeno (DBO) 416
Demanda química de oxígeno (DQO) 416
Pérdidas por calcinación 416
Carbono orgánico total (COT) 416
Contaminantes inorgánicos 416
Aguas residuales de las industrias lácteas 417
Agua de enfriamiento 417
Aguas residuales sanitarias 417
Aguas residuales industriales 417
pH de los efluentes lácteos 418
Reducción de la cantidad de contaminantes en las aguas residuales 418
Tratamiento general de la leche 418
Area de producción de queso 419
Area de producción de mantequilla 419
Area de producción de leche en polvo 419
Area de envasado de leche 419
Control de los vertidos 419
Tratamiento de las aguas residuales 420
Tratamiento mecánico 421
Tratamiento químico 421
Tratamiento biológico 422
Tratamiento de los lodos 422

Literatura 425

Índice 427

AMV EDICIONES

A. MADRID VICENTE, EDICIONES
Calle Almansa, 94, 28040 Madrid (España)
Tel. 91 533 69 26 Fax. 91 553 02 86
Correo electrónico: amadrid@acta.es
Internet: www.amvediciones.com

MUNDI-PRENSA

EDICIONES MUNDI-PRENSA
Calle Castelló, 37, 28001 Madrid (España)
Tel. 91 436 37 00 Fax. 91 575 39 98
Correo electrónico: libreria@mundiprensa.es
Internet: www.mundiprensa.com

ISBN: 84-89922-81-0 (AMV Ediciones)
ISBN: 84-8476-094-4 (Mundi-Prensa)