

**NOCIONES TEÓRICAS DEL
PROCESO DE
PASTEURIZACIÓN DE LA
LECHE**

Nociones Teóricas del Proceso de Pasteurización de la Leche

Pasteurización de la Leche

La leche fresca, después de la filtración o clarificación centrífuga, debe someterse rápidamente a la pasteurización. Se necesita este tratamiento para destruir las formas vegetativas de algunas bacterias patógenas, tales como el bacilo tuberculoso del bovino (*Mycobacterium tuberculosis*) como del humano, las salmonelas, especialmente la *S. thyphi*, las bruselas, estreptococos piógenos y sobre todo especies que frecuentemente originan infecciones graves y epidemias provocadas por la leche. Pero, la pasteurización también elimina un gran número de otras bacterias termolábiles, patógenas como los estafilococos hemolíticos, *Coxiella burneti* y algunos coliformes, no patógenos, como las bacterias lácticas, siempre presentes y susceptibles de alterar la leche. La pasteurización destruye además ciertas enzimas, en especial la lipasa, cuya actividad es indeseable. Por lo tanto, la pasteurización no sólo sana la leche sino que también prolonga el tiempo de conservación, pero como la leche pasteurizada no es totalmente estéril, debe enfriarse rápidamente

hasta 5 °C y guardarla refrigerada, con el fin de evitar la proliferación de bacterias termoresistentes.

La pasteurización se hace a 63 °C durante 30 minutos, entre 72-75 °C durante 15 segundos o bien instantáneamente a 95 °C. Algunos consideran que la temperatura de pasteurización es 72 °C en 15 segundos mínimo y otros lo hacen a 79 °C entre 20-25 segundos y se enfría a 7.2 °C o menos. La pasteurización a 63 °C se efectúan en tanques cerrados, provistos de agitadores; las pasteurizaciones rápidas a temperaturas elevadas (HTST), se hacen en cambiadores de calor tubulares o de placas.

Mediante el control de inactivación de la fosfatasa alcalina, que está presente en la fase acuosa y en la superficie de los glóbulos grasos, se puede saber si la pasteurización fue suficiente ya que esta enzima tiene una sensibilidad al calor muy próxima a la de las bacterias patógenas citadas. Su inactivación se comprueba por una reacción de hidrólisis de fenol-fosfato, si hay liberación de fenol se obtiene, con un reactivo orgánico, una reacción coloreada. La Figura 2, reproduce las curvas de temperatura de la inactivación de la fosfatasas y lipasas de la leche.

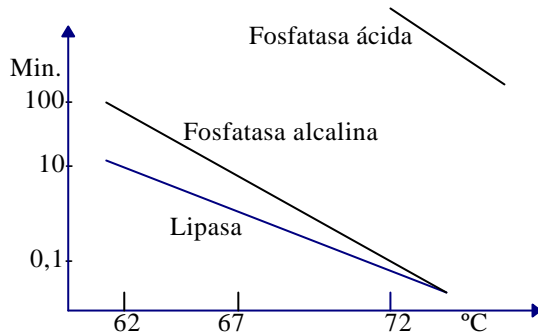


Figura 2.

Otra prueba de la eficacia de la pasteurización se fundamenta en la inactivación de las reductasas microbianas. El sustrato que se utiliza es el azul de metileno, en realidad, esta reacción se utiliza para conocer concretamente las propiedades bacteriológicas de la leche antes de la pasteurización.

La pasteurización no modifica prácticamente el sabor de la leche y cambia muy poco su valor nutritivo. La pérdida de tiamina es del 0 % a 10 %, la del ácido ascórbico más elevada, pero sin importancia nutritiva, dado el bajo contenido de vitamina C de la leche de vaca. La riboflavina y la pirodoxina son sensibles a la luz, la protección de estas vitaminas aconsejaría emplear para la leche botellas de vidrio oscuro, pero el

público no las acepta. Aún más, está en regresión el empleo de recipientes de cristal para la leche, los embalajes de cartón y los materiales plásticos que protegen a la leche contra la luz.

Constituyentes Químicos y Estado Físico:

La leche de vaca es el producto integral del ordeño total e ininterrumpido de una vaca lechera, bien constituida, bien alimentada y no fatigada. Debe recogerse limpiamente y sin calostro.

La siguiente Tabla da la composición media de los principales constituyentes de la leche de vaca.

Constituyentes	Concentración (g/l)
Agua	870
Proteínas	35
Caseínas	27
Otras proteínas	7
Lípidos	35 a 40
Acidos grasos esenciales	1
Glúcidos	51
Lactosa	49
Oligosacáridos	trazas
Sales minerales	7

Vitaminas hidrosolubles	Concentració n mg/100ml
Ac. Ascórbico (C)	2100
Tiamina (B ₁)	40
Rivoflavina (B ₂)	150
Niacina (PP)	60-200
Pirodoxina (B ₆)	$2.5 \times 10^3 - 10^6$
Ac. Pantoténico	0.325
Ac. Fólico	0.006
Cobalamina (B ₁₂)	0.0005
Biotina	1.5-5.0
Colina	13
Inositol	15
Vitaminas liposolubles	Concentració n U.I./100ml
A	160
D	0.3-4
E	60-150 μ g
K	4.7 μ g

Tabla 1.

Composición química de la leche

La leche es un sistema coloidal constituido por una solución acuosa de lactosa (5 %), sales (0.7 %) y muchos otros componentes en estado de disolución, donde se encuentran las proteínas (3.2 %) en estado de

suspensión y materia grasa en estado de emulsión. La leche contiene también enzimas, anticuerpos, hormonas, partículas en suspensión (glóbulos de materia grasa, micelas de caseína) y aún ciertas células (macrófagos), inevitablemente también contiene microorganismos y a veces de forma accidental, antibióticos y antiparasitarios.

La composición de los distintos tipos de leche, y entre un mismo tipo, varía mucho en función de la alimentación, período de lactancia, época, raza, lugar, etc., del animal.

Desde un punto de vista físico, la leche constituye un sistema complejo: es un sistema coloidal de partículas en una fase acuosa dispersante. Por un lado, las partículas son glóbulos de materia grasa (en general, de 3 a 5 μm de diámetro), pero en otro aspecto hay micelas proteicas (del orden de 0.1 μm de diámetro), formado por la interacción de la caseína y otras proteínas entre sí y con las sales minerales presentes en la fase acuosa.

Estas son las partículas en suspensión que resultan responsables de la “consistencia”, opalescencia y aspecto blancuzco de la leche; este último carácter se debe, a la dispersión de la luz por las micelas proteicas.

Homogeneización de la leche

La homogeneización de la leche se obtiene haciéndola pasar bajo presión elevada (150 a 250 kg/cm²) a través de orificios o válvulas muy estrechos, con lo que el tamaño de los glóbulos grasos se reduce aproximadamente 1/5 del inicial (5 micrómetros). También se destruyen parcialmente las micelas de caseína y los pedazos se adhieren a la superficie de los glóbulos grasos. Estos dos fenómenos estabilizan la emulsión, retardando la decantación y coalescencia.

La homogeneización también mejora la consistencia de la leche, aumenta su blancura y hace los lípidos más digestibles, porque las lipasas digestivas penetran mejor en una emulsión más fina. Por esta misma razón, la leche homogeneizada es muy sensible a las lipasas endógenas de la leche. Se considera también que la homogeneización mejora la digestibilidad de las caseínas, porque hace la cuajada estomacal menos compacta.

La homogeneización se hace a 70 °C y frecuentemente después de la pasteurización, puede hacerse sobre la leche entera o parcialmente descremada.

Propiedades Físico Químicas

Desde el punto de vista físico químico, la leche es un producto complejo, para lo cual es imprescindible el conocimiento de su estructura.

Los componentes de la leche se encuentran en diferentes formas físicas. El estado físico depende principalmente del grado de dispersión. Las partículas tienen diámetro inferior a 1 nm, pueden atravesar membranas semi-permeables y separarse mediante los procedimientos de ultrafiltración.

Se hará referencia a las propiedades de la leche entera que se utilizará en el proceso de pasteurización.

- *Acidez de la leche*

La acidez de la leche es un parámetro bastante constante en la leche y su aumento indica una anormalidad. El pH de una leche normal varía entre

6.2-6.8, pero la mayoría de las leches tienen un pH comprendido entre 6.4-6.6.

- *Punto de congelación*

El punto de congelación es una de las constantes físicas más estables de la leche. El punto de congelación de la leche entera puede oscilar entre -0.52 °C y -0.56 °C (con valor medio de -0.54 °C).

- *Punto de ebullición*

El punto de ebullición de la leche es de 100.5 °C .

- *Densidad de la leche*

La densidad relativa media de la leche a $15\text{ °C}/15\text{ °C}$ es de 1.032 y un rango de (1.028-1.035). Esta varía con la temperatura y la densidad de cada uno de sus componentes. En la leche entera es conveniente medir la densidad a 30 °C para que la materia grasa esté en su estado líquido, ya que en estado sólido la grasa tiene una densidad superior y es bastante elevada. La densidad relativa de los componentes de la leche entera a 30

°C es: materia grasa 0.913, sólidos no grasos 1.529, lactosa 1.523, proteínas 1.35 y cenizas 5.5. Conociendo la composición de la leche se puede calcular la densidad con la siguiente ecuación:

$$d_{leche} = \frac{100}{\frac{\% MG}{0.913} + \frac{\% L}{1.63} + \frac{\% P}{1.35} + \frac{\% C}{5.5} + \frac{\% Agua}{1}}$$

donde:

MG : materia grasa.

L : lactosa.

P : proteína.

C : cenizas.

La densidad de la leche varía en el rango de temperatura de trabajo, para considerar la misma se buscó una relación que se ajusta de la mejor forma a los datos siguientes:

Temperatura (°C)	δ (kg/m ³)
0	1035
20	1030
70	1012

Tabla 2.

Se realizó el ajuste con el criterio de mínimos cuadrados y se obtuvo:

$$r(T) = 1035.705 - 0.33462 T$$

- *Calor específico*

El calor específico de la leche es variable según su contenido graso. El valor medio para la leche entera es de 0.93 cal/g °C, para la leche desnatada de 0.95 cal/g °C y para la nata con un 40 % de materia grasa de 0.68 cal/g °C.

En el rango de temperatura se considera que el mismo es constante.

- *Tensión superficial*

La tensión superficial de la leche desnatada varía con la temperatura, para la leche desnatada a 0 °C es de 55,60 dinas/cm y para la leche entera es de 53 dinas/cm.

La diferencia se debe a que la materia grasa ejerce un efecto depresivo sobre la tensión superficial que disminuye proporcionalmente a la riqueza en grasa de la nata. Se produce un aumento de la tensión superficial por el

calentamiento, la agitación y la homogeneización. La liberación de ácidos grasos en la hidrólisis hace disminuir considerablemente la tensión superficial.

- *Viscosidad de la leche*

La viscosidad de la leche es función del número y tamaño de las partículas y también de la temperatura. La viscosidad de la leche entera es de 2.1 centipoise y de la leche desnatada es 1.8 centipoise. La viscosidad de la leche desnatada disminuye proporcionalmente con los tratamientos térmicos hasta 62 °C, temperatura a partir de la cual los tratamientos térmicos tienen el efecto de aumentar la viscosidad.

Temperatura (°C)	μ (Ns/m ² *10 ³)
0	4.28
20	2.12
70	0.70

Tabla 3.

Para considerar la variación de la viscosidad con la temperatura, una relación que ajusta los datos de la tabla es la fórmula de Andrade.

$$\mu(T) = e^{-7.36228 + \frac{2396.814}{T + 273.15}}$$

en este caso la unidad de la viscosidad es centipoise [cp] = [Ns/m²*10³].

- *Conductividad eléctrica de la leche*

La conductividad eléctrica de la leche normal o entera es del orden de los 0.005 ohm⁻¹ a 25 °C.

- *Índice de refracción de la leche*

El índice de refracción de la leche a 20 °C tiene un valor medio de 1.34209, siendo el del agua de 1.33299. La medida del índice de refracción se utiliza en Tecnologías lecheras para determinar el grado de concentración de la leche en los procesos de evaporación, ultrafiltración y ósmosis inversa.

- *Conductividad térmica de la leche*

La conductividad térmica de la leche es de 0.53 W/(m °C) a 25 °C y en el rango de temperatura de trabajo (-0.50 °C a 90 °C) la misma es constante.

Pasteurización HTST

En la Figura 3 se muestra el proceso que será simulado, se trata de un pasteurizador del tipo HTST (*High Temperature - Short Time*, Temperatura Alta - Tiempo Corto). La corriente *FL1* es la corriente de leche fresca que alimenta al equipo, su temperatura es 4 °C. Esta corriente se mezcla con la corriente *FL11* con el fin de elevar su temperatura.

La corriente resultante es alimentada al equipo *ICP*. Este equipo es un intercambiador de calor que precalienta la leche fresca al tiempo que enfría la leche ya pasteurizada, corriente *FL7*. La corriente precalentada, *FL3* es impulsada por una bomba de engranajes *BI* hacia el calentador *ICC*. En este equipo la leche es calentada con vapor hasta alcanzar la temperatura de pasteurización fijada en 75 °C. Esta temperatura se mantiene durante aproximadamente 26 segundos en el equipo *TP*. Este equipo es simplemente un tubo adiabático.

Una fracción de la leche pasteurizada es recirculada para elevar la

temperatura de la alimentación, y la restante se utiliza en el precalentador *ICP*. Finalmente, la leche es enfriada utilizando amoníaco en el equipo *ICE*.

Existe un controlador *CT* del tipo P+I (acción Proporcional e Integral) que controla la temperatura de salida de *TP* regulando la apertura de la válvula *V1*.

Esquema del proceso de pasteurización

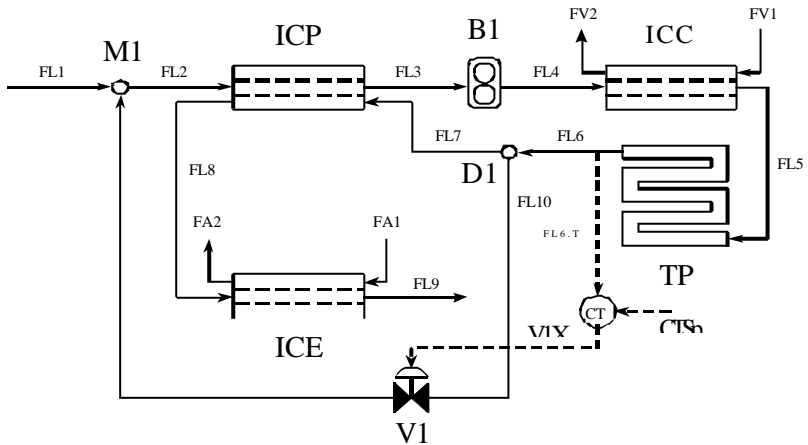


Figura 3.

En el diagrama de flujo del proceso de pasteurización se muestran los equipos que se utilizan y son los siguientes:

Mezclador	M1
Intercambiador de Calor Pre calentador	ICP
Bomba	B1
Intercambiador de Calor Calentador	ICC
Tubo Pasteurizador	TP
Divisor	D1
Controlador de Temperatura	CT
Válvula	V1
Intercambiador de Calor Enfriador	ICE

Características de cada uno de los equipos

Mezclador (M1): en este caso es una conexión cuyo objeto es juntar dos corrientes para formar una tercera. La nueva corriente tiene distintas propiedades y variables de estado.

Bomba (B1): es un equipo que cumple la función de proporcionar energía con el objeto de transportar un líquido. De los distintos tipos de bombas se seleccionó una bomba de engranajes rotatorios, que es de

desplazamiento positivo, donde la parte no dentada de los engranes que están a la entrada de la bomba proporcionan un espacio para ser llenado por el líquido, cuando el engrane gira, el líquido es atrapado entre el diente y el cuerpo de la bomba, posteriormente es liberado en la línea de descarga. Con estas bombas se pueden manejar cualquier tipo de líquidos libre de abrasivos y son indicados para fluidos de alta viscosidad.

Las bombas rotatorias son capaces de entregar una capacidad aproximadamente constante, contra cualquier presión dentro de los límites de diseño de la bomba. El flujo de descarga varía directamente con la velocidad y está casi libre de pulsaciones.

Intercambiador de Calor (IC): se consideran intercambiadores de calor a todos los dispositivos en el que se verifica un intercambio de calor desde un fluido caliente a un fluido frío separados por una pared sólida. Los dos fluidos pueden ser un líquido, un gas, un vapor condensante o un líquido en ebullición. En el caso del proceso de pasteurización se utilizan como dispositivos para el calentamiento y enfriamiento de la leche.

Intercambiador de Calor Precalentador (ICP): es un dispositivo de doble tubo, que se utiliza para precalentar la alimentación

utilizando una corriente de fluido caliente que circula por el ánulo, que en estado estacionario tiene la temperatura de pasteurización. Se trata de aprovechar el calor sensible de la corriente caliente que sale del tubo pasteurizador y que debe ser enfriada a una temperatura aproximada de 4 °C. El reciclo de leche es necesario para lograr un proceso continuo que alcance la temperatura de pasteurización.

Intercambiador de Calor Calentador (ICC): también es de doble tubo, cuyo propósito es entregar a la corriente proveniente del ICP previo paso por la bomba, la energía calórica necesaria para que la corriente de salida alcance la temperatura de pasteurización que es de 75 °C. El aporte de calor se realiza mediante una corriente de vapor que circula por el ánulo, que tiene una temperatura de 135 °C, y una presión de 8 atm. El calor intercambiado es equivalente al calor latente, correspondiente a la cantidad de vapor condensado.

Intercambiador de Calor Enfriador (ICE): para el caso del pasteurizador se utiliza como medio refrigerante el amoníaco, que tiene un punto de ebullición de -33 °C a la presión atmosférica. El objeto del equipo es enfriar la corriente de leche que sale del ICP hasta la temperatura de 4 °C.

Tubo Pasteurizador (TP): tiene el objeto de mantener a la leche durante un tiempo de 25 segundos a la temperatura de 75 °C, razón por la cual se considera un tubo totalmente aislado (adiabático), donde solamente hay caída de presión que depende de la disposición del mismo.

Controlador de Temperatura (CT): tiene el objeto de examinar la temperatura (variable controlada) de salida del pasteurizador, para controlar con mayor precisión el proceso. La acción se logra a través de un control manual (operador) o a través del control automático (por medio de instrumentos).

En el caso del control manual, el operador en base a medidas periódicas de temperatura, por ejemplo, si es inferior al valor deseado aumenta la recirculación de leche abriendo la válvula. Este caso es importante cuando se realiza la puesta en marcha del pasteurizador.

En el control automático se emplea un dispositivo sensible a la temperatura para producir una señal proporcional a la temperatura medida. Esta señal se alimenta a un controlador que la compara con un valor deseado preestablecido, *set point*. Si existe diferencia, el

controlador cambia la abertura de la válvula de control para corregir la temperatura al valor deseado.

Divisor (D1): es una conexión que tiene como fin separar una corriente en dos, aquí se mantiene la composición, la temperatura, la presión, etc.. Este equipo es necesario para poder reciclar una parte del caudal para lograr la temperatura requerida a la salida del ICC.

Válvula (V1): es una conexión cuya función es controlar el flujo de la corriente que lo atraviesa o de cerrar completamente. Permite controlar el flujo de líquido en forma automática o manualmente con el objeto de alcanzar la temperatura de pasteurización.