

# DISEÑO MECATRÓNICO DEL PROCESO DE PASTEURIZADO DE LECHE DE UNA PLANTA PROCESADORA DE PRODUCTOS LÁCTEOS

## MECHATRONIC DESIGN OF THE MILK PASTEURIZATION PROCESS OF A DAIRY PROCESSING PLANT

TEJERINA DURAN, E. F., TORO GARCÍA, J. M.

### RESUMEN

En los últimos 4 años, la producción mundial de lácteos ha experimentado un crecimiento anual del 4.5%. A pesar de los desafíos derivados de la pandemia de COVID-19, se observó un aumento en el consumo de productos lácteos envasados, ya que esto permitía evitar el contacto directo y garantizar la inocuidad al prevenir el desarrollo de microorganismos debido a la ausencia de oxígeno. A nivel global, la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda un consumo de 160 litros de leche por persona al año. Sin embargo, en Bolivia el consumo per cápita de leche es de 64,5 litros, lo que indica una brecha entre el consumo actual y las recomendaciones de la OMS. Para abordar esta situación, el Estado ha implementado políticas, como el programa PROLECHE, que han generado un incremento en el consumo de leche y sus derivados en Bolivia. En promedio, el consumo per cápita ha aumentado en 2.8 litros por año, pasando de 42 litros en 2011 a la cifra actual. En términos de producción, Bolivia cuenta con alrededor de 10981 productores de leche a nivel nacional, quienes generan anualmente aproximadamente 753 millones de litros de leche. Según datos de Frerking, en 2018, Santa Cruz fue responsable de aportar 451 millones de litros de leche, representando alrededor del 60% de la producción total del país. En conclusión, la producción de lácteos ha experimentado un crecimiento anual a nivel mundial, a pesar de las dificultades ocasionadas por la pandemia. En Bolivia, se ha identificado una brecha entre el consumo actual y las recomendaciones de la OMS, pero se han implementado políticas que han impulsado el consumo y la producción de lácteos en el país. Santa Cruz se destaca como la principal región productora, contribuyendo significativamente al abastecimiento nacional.

### ABSTRACT

In the last 4 years, world dairy production has experienced an annual growth of 4.5%. Despite the challenges derived from the COVID-19 pandemic, an increase in the consumption of packaged dairy products was observed, since this allowed avoiding direct contact and guaranteeing safety by preventing the development of microorganisms due to the absence of oxygen. Globally, the World Health Organization (WHO) recommends a consumption of 160 liters of milk per person per year. However, in Bolivia per capita milk consumption is 64.5 liters, indicating a gap between current consumption and WHO recommendations. To address this situation, the State has implemented policies, such as the PROLECHE program, which have generated an increase in the consumption of milk and its derivatives in Bolivia. On average, per capita consumption has increased by 2.8 liters per year, from 42 liters in 2011 to the current figure. In terms of production, Bolivia has around 10,981 milk producers nationwide, who annually generate approximately 753 million liters of milk. According to data from Frerking, in 2018, Santa Cruz was responsible for contributing 451 million liters of milk, representing around 60% of the country's total production. In conclusion, dairy production has experienced annual growth worldwide, despite the difficulties caused by the pandemic. In Bolivia, a gap between current consumption and WHO recommendations has been identified, but policies have been implemented that have boosted dairy consumption and production in the country. Santa Cruz stands out as the main producing region, contributing significantly to the national supply.

### PALABRAS CLAVE

Pasteurización  
Automatización  
Leche

### KEYWORDS

Pasteurization  
Automation  
Milk

## INTRODUCCIÓN

La pasteurización es un proceso térmico que se utiliza para eliminar microorganismos patógenos y prolongar la vida útil de los alimentos líquidos, la cual consiste en calentar el producto líquido a una temperatura alta por un corto período de tiempo para eliminar los microorganismos presentes.

En la industria alimentaria, la pasteurización se aplica en la producción de productos lácteos, jugos, bebidas y otros alimentos líquidos que requieren una larga vida útil y seguridad alimentaria. Una de las partes esenciales en la implementación de este proceso es la máquina pasteurizadora HTST, la cual se encarga de calentar y enfriar el producto líquido en un tiempo y temperatura específicos.

El propósito es crear un diseño para una máquina pasteurizadora de leche que pueda ser utilizada en una planta procesadora de lácteos en el departamento de Santa Cruz.

El objetivo principal es proveer a las pequeñas empresas de la región con una herramienta que les permita cumplir con la demanda en épocas de mayor producción.

En el proceso de pasteurizado existen 3 métodos de pasteurización, el BATCH, HTST Y UHT, siendo los dos más usados el HTST y UTH dentro de la pequeña a mediana empresa.

Se diferencian uno del otro en el tiempo de pasteurizado debido a que en el proceso de HTST el tiempo de pasteurización es más largo, pero con una temperatura menor.

En el proceso de HTST se introduce la leche a una temperatura de 4 °C, luego atraviesa la bandeja intercambiadora de calor donde llega a subir a una temperatura de 72 °C, luego pasa al tubo de sujeción durante 15 segundos donde está a 75 °C, luego se procede a devolverla a la sección regenerativa donde baja a una temperatura de 32 °C antes de volver al intercambiador de calor donde acaba con una temperatura de salida de 4 °C.

En este caso la cantidad óptima es de 2000 litros hora, pero también se tiene que tomar en cuenta el tiempo de ingreso de los lotes y también las horas laborables, debido que tener una máquina sobredimensionada a la capacidad de obtención de materia prima, sería un gasto innecesario y también se perdería horas laborables.

Por otro lado, el proceso de UTH implica un proceso de precalentamiento seguido de una exposición a altas temperaturas donde el producto se bombea a través de un sistema de eliminación de aire hasta el intercambiador de calor, luego de calentar el producto pasa por el tubo de retención donde recibe el efecto llamado tiempo-temperatura, cumplido ese paso se dirige a la unidad de refrigeración donde se enfría para conservar los nutrientes y la composición original del sabor antes de ser envasado.

El tamaño de las pasteurizadoras que se tiene dentro de la industria oscila entre los 2000 y 5000 litros hora, sin embargo, el de 2000 es el más común dentro de las pequeñas a medianas industrias.

## DESARROLLO

Los factores críticos que deben ser controlados cuidadosamente en el proceso de pasteurización son la temperatura, el tiempo de aplicación, el volumen y flujo del producto, y la composición y características del producto. La temperatura es la variable más importante.

Se debe pasteurizar la leche a 72 °C y eliminar el 100% de las bacterias, que equivale a reducir el número de bacterias en un factor de 100. La concentración inicial de bacterias es de  $N_1 = 100$

000 UFC/ml y se desea reducir la concentración a  $N_2 = 100$  UFC/ml, que es el valor normado por SENASAG.

Diseño del sistema mecánico del proceso de pasteurización: Para este sistema primero se optó por el modelamiento de la estructura mediante software. Para facilitar la comprensión del diseño y construcción del mismo, ver figura 1.

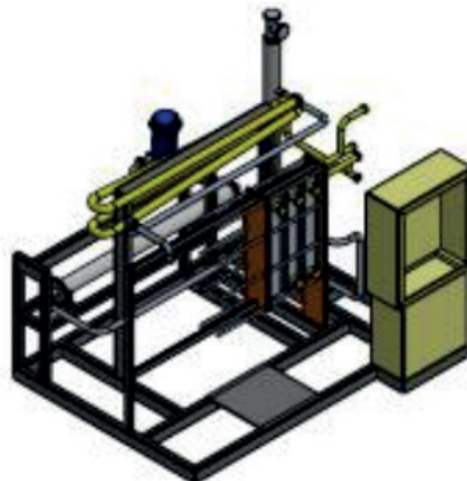


Figura 1. Vista isométrica del Sistema Mecánico del Proceso de Pasteurización

La estructura consta de 6 partes, las cuales son:

La base sirve para poder alojar todos los soportes y brindar soporte a la estructura.

El soporte número 1 se utiliza para mantener la tubería en su lugar y prevenir el movimiento no deseado o vibración.

El soporte número 2 tiene la misma función, de prevenir el movimiento no deseado, además se encarga de soportar las tuberías donde entra la leche a pasteurizar y también soportar la válvula mariposa.

Las tuberías se encargan de la distribución de la materia prima hacia el intercambiador de calor, que saldrá por el otro extremo para entregar la leche pasteurizada y son necesarias para el correcto funcionamiento del proceso de pasteurización.

El intercambiador de calor se encarga de calentar el producto a la temperatura adecuada, recibiendo de las tuberías la materia prima que pasa por las placas, que se encuentran calentadas por vapor, ocurriendo el choque térmico.

El tablero eléctrico permite encender y apagar la máquina, regular la temperatura, controlar la velocidad de las bombas, monitorear el flujo de los líquidos y realizar otras funciones necesarias para el correcto funcionamiento de la pasteurizadora.

Además, el tablero eléctrico también puede incluir sistemas de protección contra sobrecargas y cortocircuitos, lo que garantiza la seguridad de la máquina y de las personas que la utilizan.

El análisis de deformación en la estructura de la máquina pasteurizadora sirve para determinar cómo se deformará la estructura bajo diferentes cargas y condiciones de carga, ayudando a garantizar que la estructura sea segura soportando la carga prevista.

El análisis indica que podrá soportar  $8.059e^{+1}$  N/m<sup>2</sup> como mínimo

y como máximo podrá soportar  $1.198e^{+9}$  N/m<sup>2</sup>. Esto es una ventaja porque en los puntos donde se apoya la mayor carga, es donde no existe punto de deformación y es un diseño donde el peso recarga en la parte inferior.

La eficiencia terminal es la medición correcta de la cantidad de calor transferido al producto durante el proceso de pasteurización donde se toman los siguientes parámetros: Primero la densidad de la leche que es 1,03 kg/l y su calor específico es 3,93 kJ/kg°C, y la capacidad de la máquina que es de 2000 litros wde leche. Como se sabe que en una máquina pasteurizadora la temperatura inicial es de 4°C y la temperatura de pasteurización es 72-75 °C, y que el calentamiento eléctrico de una pasteurizadora es de 100 kW, se tienen los valores para calcular el calor transferido y el suministrado, siendo la eficiencia térmica de 37,71 %.

Para un caudal de 2000 l/h y una presión de 3 bar se seleccionó una bomba con una potencia de 3 HP y de acero inoxidable.

Las normas utilizadas para la construcción del equipo de pasteurización de la leche fueron:

La norma PMO establece los requisitos para la producción, procesamiento y distribución de la leche pasteurizada y otros productos lácteos en los Estados Unidos.

NB 375:2011 - Norma Boliviana de Equipos de Procesamiento de Alimentos.

NB/ISO 14159:2007 Requisitos de higiene para el diseño de las máquinas.

NB 375:2011 - Norma Boliviana de Equipos de Procesamiento de Alimentos.

NB/ISO 12100:2010 Seguridad de las máquinas - Principios generales de diseño - Evaluación del riesgo y reducción del riesgo.

En el proceso de pasteurización las variables son las siguientes: Variables eléctricas: Demanda máxima de energía eléctrica de 8338 W y la demanda útil o requerida de 6670 W.

Voltaje: 220VAC 1F, o 380VAC 3F.

Corriente Eléctrica: 44.6 A

Tabla 1. Rangos de medición de temperatura

Descripción	Variable			
	Tiempo, s	Temperatura de la leche, °C	Presión de vapor, bar	Caudal m <sup>3</sup> /s x10 <sup>-4</sup>
Inicio	-	Ambiente	--	5.56
Pre calentamiento	900 - 1800	62 - 65	--	5.56
Pasteurización	15 - 30	72 - 75	2 - 4	5.56
Enfriamiento	25	4 - 5	--	5.56

En el dimensionamiento de la instrumentación del proceso se tomaron en cuenta:

La variable tiempo se controló mediante un controlador lógico programable (PLC).

La variable temperatura se midió con un sensor de temperatura cuyos rangos se encuentran en la Tabla 1. La variable Presión, medida por un sensor de presión

capacitivo con su respectivo transmisor de señal a 0-10VDC.

La variable caudal medida por un flujómetro electromagnético con su respectivo transmisor de señal de 0-10VDC.

Para el dimensionamiento del PLC se tomaron en cuenta los criterios siguientes:

Características de entrada y salida: Se requiere salida a Relé, 220VAC.

Capacidad de entrada y salida: 3 entradas digitales, 3 entradas analógicas, y 10 salidas digitales.

Comunicaciones:

Se requiere comunicación Ethernet para la HMI. Conjuntos de instrucciones: Instrucciones básicas y matemáticas.

De acuerdo con los requerimientos del proceso el PLC S7-1200 cumplió con todos ellos.

El proceso de pasteurizado se inicia de acuerdo con la siguiente secuencia:

Antes del inicio del proceso revisar que el tanque de almacenamiento de la leche se encuentre lleno de la materia prima.

Activar la válvula mariposa 1 para la entrada de la leche. Ajustar la válvula de regulación de presión para controlar el flujo de la leche cruda al proceso. (Todos estos pasos con la máquina en reposo o apagada).

Encendido de la máquina mediante el pulsador de marcha.

Configurar el controlador de temperatura y presión para que coincida con las especificaciones de pasteurización.

Activar la bomba centrífuga sanitaria del producto, para que bombee la leche cruda hacia la sección de pasteurización.

Activar la válvula mariposa 2 para que salga el producto pasteurizado, ajustando la velocidad del flujo de la leche pasteurizada.

Monitorear los controladores de temperatura y presión mientras la máquina se calienta y ajustar los controladores según sea necesario.

Bombear la leche cruda a través del intercambiador de calor hacia la zona de pasteurización mediante la bomba centrífuga sanitaria del producto.

Abrir la válvula (mariposa 2) de salida del producto pasteurizado y ajustar la velocidad del flujo de la leche pasteurizada.

Monitorear los controladores de temperatura y presión mientras la máquina se calienta y ajustar los controladores según sea necesario.

Enfriar la leche a través del intercambiador de calor y llevar a la temperatura adecuada para su almacenamiento.

La programación del sistema de automatización se realizó en el software TIA PORTAL DE SIEMENS.

La pantalla HMI KTP-400 de la marca Siemens es la encargada de visualizar las salidas y las variables presentes en el sistema, permitiendo accionar de manera remota todo el proceso.

La configuración inicial se centró en la visualización y control de los procesos de la máquina pasteurizadora. Esta configuración permite obtener información crucial sobre el proceso, como la visualización en tiempo real, la temperatura de trabajo, la presión

las fuerzas simuladas en la tolva, no generan un esfuerzo que supere el límite estático, siendo que toda la estructura está en la zona elástica.



Figura 4. Esquema principal del sistema

El programa principal del PLC se estructura en cinco etapas principales: ingreso al sistema, configuración y selección de receta, habilitación e inicio ciclo, ciclo de pesaje, dosificación y ciclo de descarga de los aditivos. Siendo la balanza un proceso compartido para la dosificación a cada uno de los aditivos.

El funcionamiento de la máquina se realizó pensando en una operación con un sistema de control automático, para los cuales se diseñó un sistema de control con un Controlador Lógico Programable, PLC, e interfaz hombre máquina, HMI, y elementos de control electromecánico como contactores, relés térmicos, los cuales, mediante un circuito, permiten el funcionamiento de la máquina.

De igual manera se utilizó un tablero de mando para el control automático, así como también paros de emergencia, garantizando un manejo fácil y seguro de todo el sistema. Se resalta que se utilizó un sistema con PLC y HMI, el cual permite un panel de control con pocos elementos de control electromecánicos, ayudando a optimizar costos como también el espacio dentro del tablero de control. Está constituido por dos circuitos principales que son: circuito de potencia y circuito de control.

Selección de subalimentadores y protección de los componentes:

El compresor de tornillo lubricado con aceite GA 180-10bar, 242 HP, 458 A, Conductor: 2 en paralelo de 150 mm, Protector: Disyuntor Termomagnético DWB600PE600-3DA, Tensión

nominal 380 V, Corriente nominal 500 A.

La esclusa rotativa PAV-6, 0,5 HP, 0,94 A, Conductor: 1,5 mm, Protector: Disyuntor Termomagnético UMBW-1C3-15, Tensión nominal 380 V, Corriente nominal 15 A.

Motorreductor esclusa rotativa, PAV-6, HP, 0,33, 1,4 A, Conductor: 1,5 mm, Protector: Guardamotor AZ CWC07-10-30D33 de Tensión de control 0,63 – 1.6 A, Tensión nominal 380 VAC, Corriente nominal 12 A Potencia nominal 4 HP.

Contactador de potencia CWB12- 11-04D02 de WEG Tensión de control 24 VCC, Tensión nominal 380 VAC, Corriente nominal 12 A, Potencia nominal 4 HP.

Variador de frecuencia: CF300B01 de WEG, Alimentador principal, 243 HP, 600,6 A, Conductor: 185 mm, Protector: Disyuntor Termomagnético Principal DWB600PE600-3DA Tensión nominal 380 V Corriente nominal 600A

El circuito de potencia se realizó en función a los accionamientos existentes como los motores, además de los contactores adecuados con relés térmicos, para que, al pasar la carga de potencia, los contactos puedan soportar la corriente.

En la parte de control se encuentran los siguientes componentes: Controlador Lógico Programable, PLC, HMI, sensores, relés.

Se realizó el esquema eléctrico del PLC tomando en cuenta la alimentación de 24 V, las entradas digitales y las salidas a los relés que se encargarán de la protección del controlador. El control electroneumático considerando cada aditivo del sistema de dosificación contiene cilindros, actuadores y válvula antirretorno para control de dosificación. El esquema eléctrico del sistema de pesaje contiene el transmisor de peso.

Para determinar el PLC a utilizar se realizó una descripción de las características que se necesitan para el control de todos los elementos del sistema electrónico.

Se seleccionó el PLC SIEMENS S7-1500, que es óptimo para esta aplicación, debido a que es un controlador compacto y que cumple los requerimientos de entradas y salidas necesarias para el sistema, añadiendo módulos externos, además considerando que este PLC está caracterizado para permitir realizar tareas sencillas pero muy precisas.

## CONCLUSIONES

Se determinó el método para el sistema de dosificación de la planta. La tecnología de dosificación gravimétrica es especialmente adecuada para los sistemas mecánicos, eléctricos y electrónicos. Este método de dosificación utiliza sistemas de pesaje precisos para medir y controlar las cantidades de aditivos. La dosificación gravimétrica ofrece una mayor precisión y estabilidad en comparación con otros métodos, como la dosificación volumétrica.

Además, permite un monitoreo continuo y en tiempo real de la cantidad de aditivo utilizado, lo que facilita el ajuste y la optimización del proceso. Se realizó el diseño del sistema de dosificación de aditivos acuerdo con la necesidad de uso, considerando los elementos mecánicos normalizados disponibles en el mercado nacional.

Se diseñó el sistema de dosificación de aditivos optimizando la producción, siendo capaz de producir la cantidad de 165 baches al día mejorando los tiempos para el producto final de mezclado, trabajando a máxima potencia y sin tener pérdidas de material en el proceso.

## REFERENCIAS

- PAVCO. (2 de Junio de 2017). Fabricación Tubería PVC. Obtenido de Proyecto Hydros: [https://www.youtube.com/watch?v=jsXoTPL\\_ENs](https://www.youtube.com/watch?v=jsXoTPL_ENs)
- LEÓN, J., & SIMBAÑA, E. (2012). DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA AUTOMATIZACIÓN Y MONITOREO DEL SISTEMA DE PESAJE Y MEZCLA DE MATERIA PRIMA PARA LA FABRICACIÓN DE TUBERÍA PVC EN LA FABRICA TIGRE S.A. Quito: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
- REHAU. (2022). REHAU España. Obtenido de <https://www.rehau.com/es-es/que-es-el-pv>

CITA

