

ANÁLISIS COMPARATIVO DE CURVAS DE TEMPERATURA EN SISTEMAS DE PASTEURIZACIÓN LENTA: MANUAL VS AUTOMATIZADO EN PRODUCCIÓN LÁCTEA SEMI-INDUSTRIAL

COMPARATIVE ANALYSIS OF TEMPERATURE PROFILES IN SLOW PASTEURIZATION SYSTEMS: MANUAL VS AUTOMATED IN SEMI-INDUSTRIAL DAIRY PRODUCTION

Daniel Luna¹, Víctor Valverde², Ángel Silva³, Augusto Guerrero⁴

{daniel.luna@unach.edu.ec¹, victor.valverde@unach.edu.ec², alberto.silva@unach.edu.ec³, mesias.guerrero@unach.edu.ec⁴}

Fecha de recepción: 5 de agosto de 2024 / Fecha de aceptación: 8 de agosto de 2024 / Fecha de publicación: 26 de agosto de 2024

RESUMEN: Los tratamientos térmicos en la industria alimentaria son esenciales para garantizar la seguridad alimentaria. Su objetivo es reducir poblaciones de microorganismos patógenos de la materia prima utilizada mediante los fenómenos de transferencia de calor. La temperatura y el tiempo de exposición son determinantes para destruir patógenos y conservar los nutrientes, especialmente en procesos críticos como la pasteurización. En este estudio, se implementó un sistema automático de bajo costo para monitorear y controlar la temperatura y el tiempo de residencia en el pasteurizador de la planta semi-industrial de lácteos de la UNACH, dicho sistema pretende ser una alternativa de bajo costo que puede ser replicada por asociaciones de pequeños productores de derivados lácteos de la provincia de Chimborazo. Para esto, se construyó un sistema de control automático utilizando un PLC, una termocupla, un PLC y electroválvulas, además de un router para el control a través de una aplicación móvil. Se recopiló datos y se analizó el proceso de pasteurización antes y después de la implementación del sistema. Una vez instalado el sistema fue validado, se realizaron pruebas de proceso con dos volúmenes de trabajo 150 y 250 L. El análisis estadístico mostró diferencias significativas, con lo que se logró demostrar que la variabilidad de la temperatura minimiza las perturbaciones mejorando la eficacia del proceso de pasteurización. Las pruebas adicionales demostraron que el uso del sistema de control automático mantuvo la temperatura dentro del rango óptimo 62,5 - 63 °C, garantizando el control del proceso y la eliminación de la manipulación manual de fluidos por parte del operario, constituyéndose en una alternativa viable para el control de la temperatura de pasteurización y garantizar la calidad de la pasteurización.

Palabras clave: *Pasteurización, bajo costo, control, lácteo, proceso, semiindustrial*

¹Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH), <https://orcid.org/0000-0002-3574-526X>, +5930984012979

²Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH), <https://orcid.org/0000-0001-8179-5383>, +5930995714487

³Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH), <https://orcid.org/0000-0002-1811-3340>, +5930992962640

⁴Investigador Independiente, <https://orcid.org/0009-0008-7706-5722>, +5930984012979

ABSTRACT: Heat treatments in the food industry are essential to ensure food safety. Their objective is to reduce populations of pathogenic microorganisms in the raw material used through heat transfer phenomena. Temperature and exposure time are determinant in destroying pathogens and preserving nutrients, especially in critical processes such as pasteurization. In this study, a low-cost automatic system was implemented to monitor and control the temperature and residence time in the pasteurizer of the semi-industrial dairy plant of UNACH, this system is intended to be a low-cost alternative that can be replicated by associations of small producers of dairy products in the province of Chimborazo. For this, an automatic control system was built using a PLC, a thermocouple, a PLC and solenoid valves, as well as a router for control through a mobile application. Data was collected and the pasteurization process was analyzed before and after the implementation of the system. Once the system was installed and validated, process tests were performed with two working volumes 150 and 250 L. Statistical analysis showed significant differences, demonstrating that temperature variability minimizes disturbances and improves the efficiency of the pasteurization process. Additional tests showed that the use of the automatic control system maintained the temperature within the optimal range 62.5 - 63 °C, guaranteeing control of the process and eliminating manual manipulation of fluids by the operator, constituting a viable alternative for controlling the pasteurization temperature and guaranteeing pasteurization quality.

Keywords: *Pasteurization, low cost, control, dairy, process, semi-industrial*

INTRODUCCIÓN

Entre la industria láctea desempeña un papel fundamental en la economía y la seguridad alimentaria de Ecuador, especialmente en la provincia de Chimborazo, donde la producción de leche y sus derivados constituye una importante fuente de ingresos para numerosas familias y comunidades rurales. La leche es un producto alimenticio de considerable valor nutritivo, ya que contiene vitaminas (A, B12, D) y minerales (fósforo, potasio, calcio, magnesio, selenio, yodo y zinc), lo que la convierte en un componente esencial de la dieta humana.

El sector lácteo se dedica principalmente a la producción de leche y sus derivados, como queso, yogur, y mantequilla. En Ecuador, la producción de leche cruda alcanza aproximadamente 6,15 millones de litros diarios, según (1) con datos correspondientes al año 2020. Esta actividad representa una importante fuente de ingresos para cerca de 1,2 millones de personas en el país. Asimismo, la industria láctea contribuye alrededor del 4% al Producto Interno Bruto (PIB) Agroalimentario de Ecuador, lo que resalta su impacto económico y su alto potencial de exportación. Según información del Servicio de Rentas Internas, en septiembre de 2021, el sector lácteo experimentó un crecimiento del 10,92% en comparación con el mismo mes de 2020.

En este contexto, la pasteurización se erige como un proceso crítico para garantizar la inocuidad de los productos lácteos y prolongar su vida útil. Sin embargo, los pequeños y medianos productores de la región enfrentan desafíos significativos para implementar sistemas de

pasteurización eficientes y confiables, debido principalmente a limitaciones económicas y tecnológicas.

En Chimborazo, una provincia situada en el corazón de la región andina de Ecuador, la producción láctea es una actividad económica de gran relevancia. Según datos del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), la provincia aporta aproximadamente el 7% de la producción nacional de leche, con una producción diaria estimada de 430,000 litros. Sin embargo, una proporción significativa de esta producción proviene de pequeños y medianos productores que carecen de acceso a tecnologías de pasteurización avanzadas, lo que limita su capacidad para agregar valor a sus productos y acceder a mercados más lucrativos.

La pasteurización lenta es un tratamiento térmico ampliamente utilizado en la industria alimentaria para extender la vida útil microbiológica de los alimentos mientras se preservan al máximo sus cualidades nutricionales y organolépticas (2). Aunque efectivo para eliminar patógenos y extender la vida útil del producto, el método tradicional de pasteurización lenta presenta desafíos en términos de control preciso de temperatura y tiempo, lo que puede afectar la calidad del producto final y el cumplimiento de las normas de seguridad alimentaria. Este proceso requiere someter al producto a temperaturas entre 60-80°C durante tiempos prolongados, normalmente entre 30-90 minutos (3). Para asegurar la eficacia del tratamiento, es necesario un riguroso control de tiempo y temperatura (4).

Los sistemas automatizados de control permiten monitorear y regular las variables críticas del proceso de forma precisa (5). Sin embargo, las soluciones disponibles en el mercado suelen tener un elevado costo (6), dificultando su implementación en pequeñas y medianas empresas (7) y pequeños productores de la región. En este contexto, el desarrollo de sistemas de bajo costo aparece como una alternativa prometedora para democratizar el acceso a tecnologías de automatización avanzada (8). La automatización del proceso de pasteurización ofrece un control más preciso y consistente de las variables críticas del proceso. En este contexto, surge la necesidad de desarrollar sistemas de control automatizados de bajo costo que sean accesibles y adecuados para las condiciones específicas de Chimborazo.

La implementación de sistemas de control automatizados en procesos de pasteurización ha sido objeto de numerosos estudios en diferentes contextos geográficos y productivos. Según (9) desarrollaron un sistema de control basado en PLC (Controlador Lógico Programable) para la pasteurización de leche en pequeñas industrias lácteas en India, demostrando mejoras significativas en la eficiencia energética y la consistencia del proceso. Por su parte, (10) implementaron un sistema de control SCADA para procesos de pasteurización, logrando una reducción de costos del 40% en comparación con sistemas comerciales equivalentes.

En el contexto ecuatoriano, (11) evaluaron el impacto de la automatización en la calidad microbiológica del proceso de la pasteurización en una planta de procesamiento de pulpa de guanábana, encontrando una reducción significativa en el recuento de microorganismos y una mayor uniformidad en la calidad del producto final. Estos estudios subrayan el potencial de la automatización para mejorar la eficiencia y la calidad en los procesos de pasteurización, pero

también señalan la necesidad de adaptar estas soluciones a las condiciones específicas de cada contexto productivo.

La automatización del proceso de pasteurización lenta implica el control preciso de múltiples variables, siendo la temperatura y el tiempo las más críticas. El control de temperatura en sistemas de pasteurización ha sido objeto de numerosas investigaciones en el campo del control automático. (12) compararon diferentes estrategias de control, incluyendo PID (Proporcional-Integral-Derivativo) convencional, PID adaptativo y control difuso, en un sistema de pasteurización a escala piloto. Sus resultados mostraron que el control PID adaptativo ofrecía el mejor desempeño en términos de precisión y estabilidad, especialmente en condiciones de perturbaciones externas.

Los sistemas de control en la industria de alimentos son cruciales para la eficiencia de los procesos. (13) propusieron un sistema de control basado en lógica difusa para optimizar los procesos de pesaje para la formulación y control de alimentos, estableciendo mecanismos de control como Internet de las cosas (IoT), logrando una reducción en el consumo energético sin comprometer la calidad del producto. Estos avances en las estrategias de control subrayan la importancia de integrar enfoques adaptativos y basados en la inteligencia artificial en los sistemas de automatización para pasteurización.

La selección de componentes adecuados es fundamental para desarrollar sistemas de control automatizados de bajo costo. En este sentido, las plataformas de hardware abierto como Arduino y Raspberry Pi han ganado popularidad en aplicaciones de automatización industrial a pequeña escala. (14) desarrollaron un sistema de control basado Redes Neuronales para la pasteurización de leche de cabra en pequeñas explotaciones ganaderas en México, logrando una precisión de control de temperatura de los procesos de pasteurización y una reducción del 80% de la probabilidad de contaminación por manipulación de los alimentos.

Los sensores de temperatura juegan un papel crucial en estos sistemas. Los termopares tipo K y las RTDs (Detectores de Temperatura por Resistencia) son opciones comunes debido a su precisión y robustez. Sin embargo, (15), propusieron el uso de sensores de temperatura digital DS18B20 en aplicaciones de control de temperatura tanto para la refrigeración como para la pasteurización, demostrando una precisión comparable a sensores industriales a una fracción del costo y a su vez determinando la eficiencia en el control de temperatura para estos procesos fue superior.

En cuanto a los actuadores, las válvulas solenoides y las bombas peristálticas son componentes clave para el control del flujo de leche y agua caliente en sistemas de pasteurización (5) evaluaron diferentes configuraciones de válvulas y bombas en un sistema de pasteurización automatizado, encontrando que una combinación de válvulas solenoides de 3 vías y bombas peristálticas ofrecía el mejor equilibrio entre precisión de control y costo.

La interfaz humano-máquina (HMI) es otro aspecto crucial en el diseño de sistemas de control automatizados. Pantallas LCD y teclados matriciales son opciones económicas y ampliamente

utilizadas en proyectos de bajo costo. Sin embargo, la tendencia actual se inclina hacia interfaces más intuitivas y accesibles. En este sentido, (14) desarrollaron una aplicación móvil para el monitoreo y control remoto de un sistema de pasteurización basado en el IoT, mejorando significativamente la usabilidad del sistema sin incrementar sustancialmente los costos.

El desarrollo de sistemas de control automatizados de bajo costo plantea desafíos únicos en términos de robustez y confiabilidad. La exposición a ambientes húmedos y corrosivos, típicos de las instalaciones de procesamiento de lácteos, requiere consideraciones especiales en el diseño y la selección de componentes. (16) propusieron un enfoque de diseño modular para sistemas de control en pasteurización, facilitando el mantenimiento y la sustitución de componentes, lo que resulta particularmente relevante en contextos con recursos limitados como Chimborazo.

La calibración y el mantenimiento de estos sistemas también representan aspectos críticos para garantizar su funcionamiento óptimo a largo plazo. (17) desarrollaron un protocolo de calibración in situ para sistemas de control de temperatura en pasteurización, utilizando instrumentos de referencia de bajo costo, lo que permite a los pequeños productores mantener la precisión de sus sistemas sin depender de servicios externos costosos.

Este trabajo describe el diseño e implementación de un sistema automatizado de control para pasteurización lenta basado en hardware y software de código abierto. El sistema desarrollado permite la adquisición de datos en tiempo real, el control de temperatura mediante lógica difusa y la interfaz hombre-máquina en una solución integral de bajo costo. Se presentan los resultados de las pruebas realizadas para validar el funcionamiento del sistema propuesto en un caso de estudio concreto en la planta de producción de derivados lácteos de la UNACH. CETTEPS

Los hallazgos de este estudio pueden sentar las bases para nuevos desarrollos que permitan democratizar tecnologías avanzadas de automatización en pequeñas y medianas empresas o asociaciones de productores artesanales del sector alimentario constituyendo un beneficio social.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología de estudio adoptada aquí fue la implementación y examen exhaustivo de un sistema automatizado de control de temperatura diseñado especialmente para el proceso de pasteurización lenta de la leche. El sistema consistía en tres componentes principales que fueron cuidadosamente elegidos: un termopar tipo J como sensor de temperatura, que podía medir en el rango entre 0 y 300°C; un Controlador Lógico Programable (PLC) LOGO! V8 Siemens como la unidad central de procesamiento y controlador; y tres válvulas solenoides, como se observa en la Figura 1, que servían como actuadores para controlar el flujo de vapor, agua fría y purga.

En el contexto de la investigación actual, se definieron meticulosamente los parámetros de control térmico para dos volúmenes operativos distintivos dentro de una marmita, concretamente 150 litros y 250 litros, los cuales corresponden a los volúmenes más prevalentes en los procesos de producción industrial. Con el fin de realizar un análisis estadístico robusto,

cada ensayo experimental fue ejecutado en triplicado, garantizando así la reproducibilidad de los datos obtenidos. Se procederá a la recolección de datos del sistema en la fase pre-automatización, con el objetivo de caracterizar detalladamente el proceso operante y el nivel de control manual empleado, seguido de la implementación del sistema automatizado para la evaluación comparativa del desempeño.

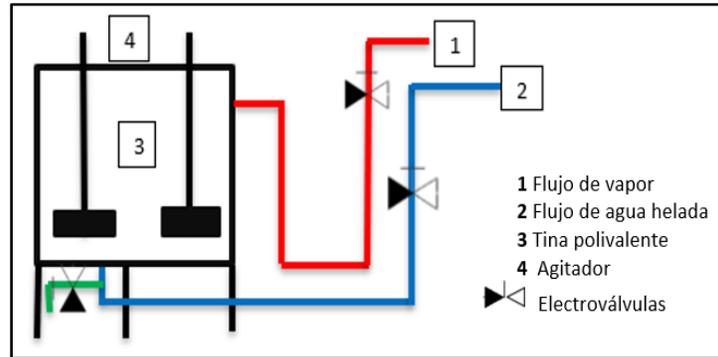


Figura 1. Distribución de válvulas en el sistema de automatización planteado.

En la Figura 2, la configuración física del sistema involucró un ensamblaje cuidadoso con válvulas solenoides estratégicamente posicionadas aproximadamente a 2 metros de la entrada a la marmita multipropósito, con un volumen de trabajo de 300 litros, de pasteurización. Una de las válvulas SNTC 91172 en el flujo de vapor presentó un desafío técnico durante esta etapa que se resolvió sustituyéndola por una válvula más sofisticada PGK50-P, que opera neumáticamente asegurando así un rendimiento máximo bajo condiciones operativas.

La programación del sistema se realizó utilizando el software LOGO Soft Comfort que implementó una lógica de control basada en histéresis con un rango preciso de variación que es 0.5°C. Esta programación permitió un control fino de la temperatura, lo cual es crítico en el proceso de pasteurización. Además, el sistema fue configurado para permitir el control remoto a través de la aplicación LOGO WEB EDITOR mejorando la operación y monitoreo desde dispositivos móviles u ordenadores en red.

El proceso automatizado de pasteurización fue diseñado para seguir tres etapas críticas: primero, un calentamiento controlado hasta alcanzar los 63°C; segundo, mantenimiento preciso de esta temperatura por tiempo programado con una varianza máxima $\pm 0.5^\circ\text{C}$; y finalmente, enfriamiento controlado hasta los $37^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.

Se utilizaron dos volúmenes diferentes de leche, los cuales son con los que comúnmente se trabaja a escala semi industrial, 150L y 250L para realizar pruebas de pasteurización en el sistema y obtener una medida precisa de su rendimiento. En estas pruebas, se recopiló intensivamente datos de temperatura de manera que se registraba cada cuatro segundos en una tarjeta SD integrada en el módulo PLC. Los datos de estas pruebas se sometieron a análisis estadístico, promediándolos para obtener treinta puntos representativos por minuto durante el período crítico de mantenimiento de la temperatura.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE CURVAS DE TEMPERATURA EN SISTEMAS DE PASTEURIZACIÓN LENTA: MANUAL VS AUTOMATIZADO EN PRODUCCIÓN LÁCTEA SEMI-INDUSTRIAL

La evaluación del sistema se basó en un análisis detallado de esta información, centrándose en dos aspectos clave: la estabilidad de la temperatura durante la fase de mantenimiento y la eficiencia del proceso de enfriamiento. Este enfoque permitió un examen completo del rendimiento del sistema bajo diferentes condiciones de carga, proporcionando valiosas lecciones sobre su efectividad y confiabilidad en el proceso de pasteurización lenta de la leche.

En la presente investigación, se realizó un análisis estadístico de datos utilizando herramientas como Excel y R-studio para demostrar diferencias significativas entre dos tipos de control. Se aplicó un análisis de varianza ANOVA y análisis de medias en R-studio para comparar los dos grupos de datos en cada volumen: proceso de pasteurización con control manual versus control automático. Además, se utilizaron gráficas de control para monitorear el desempeño del proceso de pasteurización y se aplicó una prueba de Shapiro-Wilks para evaluar la normalidad de los datos y la variabilidad entre las pruebas con ambos tipos de control.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En La pasteurización de leche en el CETTEPS de la UNACH se realizó en una marmita fabricada en acero inoxidable grado alimenticio AISI 304 con capacidad máxima de 300 litros y un grosor de 4 cm, con un diámetro de 1 m y una profundidad de 70 cm equipado con un agitador de dos aspas, impulsando por un motor de 2 Hp. El sistema está conectado a un caldero automático de 10 BHP desde donde se conduce el vapor hacia la marmita. El enfriamiento se realizó con agua como líquido de trabajo a una temperatura de entre 0,5 y 7 C, provista por un banco de hielo de 2 HP capaz de enfriar hasta 2000 litros de agua.

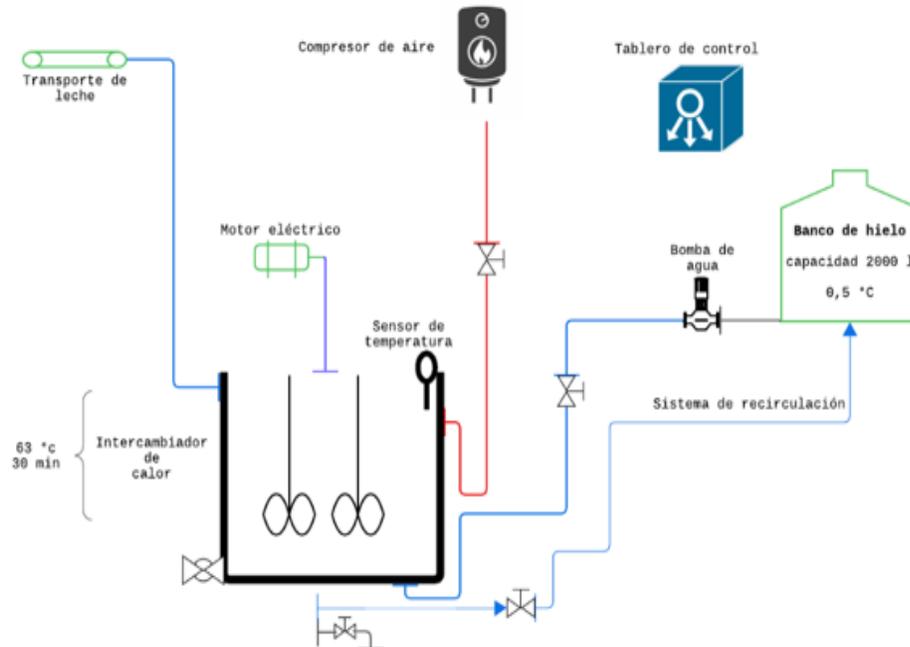


Figura 2. Esquema del sistema de control automatizado de temperatura en el proceso de pasteurización.

Esta unidad incluía un serpentín de cobre, una unidad condensadora de 2 HP y diversos accesorios de automatización, válvulas solenoides, válvulas de expansión, termostato y un tablero de control eléctrico que permite el ajuste de la frecuencia del homogeneizador y el manejo de la bomba de agua, facilitando así la circulación de agua fría a través del sistema. Un esquema de la estructura del sistema de control se muestra en la Figura 2.

La estructura del sistema de control manual se caracteriza por su simplicidad y dependencia del factor humano. En este sistema, el operador tiene la responsabilidad de monitorear de manera continua las lecturas de temperatura y realizar ajustes regulares en las válvulas para mantener la temperatura en el rango deseado. Este proceso depende de la atención, experiencia y capacidad de respuesta del operador. También, la frecuencia con la que se realizan las lecturas y ajustes puede estar influenciada por la capacidad humana, lo que puede llevar a intervalos un poco más largos entre correcciones en comparación con un sistema automatizado.

Además, la precisión de los ajustes puede verse afectada por factores como la fatiga del operador o distracciones externas. Los componentes principales en este sistema incluyen un termómetro, una fuente de calor y válvulas de control manual. Este proceso es inherentemente propenso a errores y retrasos, ya que depende de la atención, experiencia y tiempo de reacción del operador. Los resultados muestran que independientemente del volumen de trabajo, la temperatura varía entre 60.5 – 66.5 °C aproximadamente, es decir alrededor de 6 °C, durante los 30 minutos que la leche debió mantenerse a 63 °C tal y como se observa en la figura 3.

Hay que considerar que los fenómenos de transferencia de calor al ambiente provocan un descenso en la temperatura, requiriendo un consumo energético adicional en la fuente de calor. Durante los 30 minutos de la etapa de retención, se observa que la leche se encuentra fuera de los límites de control establecido alrededor de 15 minutos.

Por otro lado, la estructura del sistema de control automatizado es más compleja, pero ofrece una mayor precisión y consistencia. Los componentes principales de este sistema incluyen un PLC que tiene módulos de entrada y salida de señales, ranura para tarjeta SD, botón de inicio y para, bocina para señales sonoras, dos botones con lámparas indicadoras de válvulas, botón de emergencia, y pantalla para la lectura de temperatura en tiempo real. Este sistema mide la temperatura mediante una termocupla ajustable en la tina polivalente, tres electroválvulas dosifican el flujo de vapor, agua fría y purga, y un router capaz de transmitir la señal mediante una aplicación móvil.

Un compresor de aire acciona la válvula de vapor, la termocupla envía señales al PLC, que las procesa y controla las electroválvulas para regular el flujo. El operador puede ajustar la temperatura y el tiempo desde una aplicación, además de monitorear el proceso en tiempo real con límites de temperatura establecidos. Este sistema ofrece un control más preciso y rápido, ya que el PLC realiza cientos de lecturas por segundo y ajusta los actuadores, manteniendo la temperatura seteada. Utiliza un algoritmo de control avanzado PID, que anticipa y corrige desviaciones. La automatización permite que el operador se enfoque en la supervisión y la

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE CURVAS DE TEMPERATURA EN SISTEMAS DE PASTEURIZACIÓN LENTA:
MANUAL VS AUTOMATIZADO EN PRODUCCIÓN LÁCTEA SEMI-INDUSTRIAL**

intervención solo cuando sea necesario, lo que reduce errores y mejora la consistencia del proceso e indudablemente la calidad del producto.

El sistema automático de control de temperatura en el equipo de pasteurización de leche del CETEPS de la UNACH demostró efectividad al mantener la temperatura en $63 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, al pasteurizar 150 y 250 litros. Estos resultados son similares a los obtenidos por (18) que mantuvo la leche materna a una temperatura de $63 \pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$, así también muestran un desempeño superior al de (19) que controló el agua a 26 y 27 $^\circ\text{C}$, y (20) que controlaron entre $85 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, todos mediante PLC. La automatización requiere supervisión, centrándose en la monitorización y la intervención solo en casos excepcionales, lo que minimiza errores y mejora la consistencia del proceso.

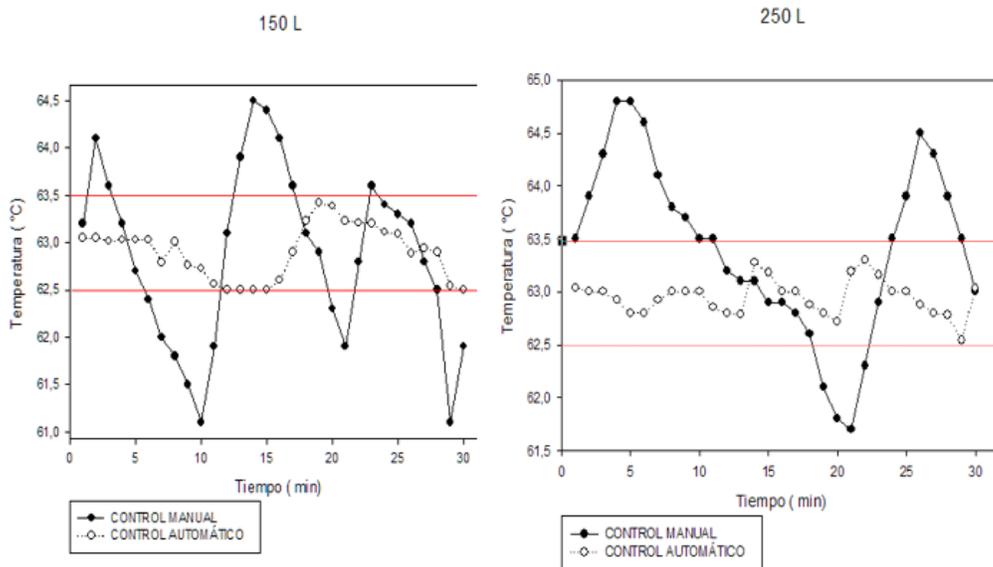


Figura 3. Gráficas de control temperatura vs. tiempo para control automático vs control manual.

La Figura 3 muestra las gráficas de monitoreo y control de los procesos manual y automatizado para los volúmenes de 150 y 250 L durante la etapa de retención en el proceso de pasteurización. Las gráficas de control revelan patrones distintivos en las curvas de temperatura de los procesos manual y automatizado de pasteurización lenta. En el sistema manual, se observa una mayor fluctuación en la temperatura a lo largo del tiempo, con picos y valles más pronunciados. Estas variaciones sugieren que los operarios realizan ajustes frecuentes para mantener la temperatura dentro del rango deseado. En contraste, la curva del sistema automatizado muestra una tendencia más suave y constante, con menos oscilaciones abruptas. Esta diferencia indica una mayor precisión en el control de temperatura del sistema automatizado, lo que podría traducirse en una pasteurización más uniforme y confiable (21).

La estabilidad y consistencia de ambos procesos se evidencian claramente en las gráficas de control. El sistema manual, aunque logra mantener la temperatura dentro de los límites aceptables, presenta una mayor variabilidad. Esta inconsistencia podría atribuirse a factores humanos como la fatiga, las distracciones o las diferencias en la técnica entre los operarios. Por

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE CURVAS DE TEMPERATURA EN SISTEMAS DE PASTEURIZACIÓN LENTA:
MANUAL VS AUTOMATIZADO EN PRODUCCIÓN LÁCTEA SEMI-INDUSTRIAL**

otro lado, el sistema automatizado de bajo costo exhibe una notable estabilidad, manteniendo la temperatura más cerca del punto óptimo durante períodos prolongados. Esta consistencia en el proceso automatizado no solo mejora la calidad del producto final, sino que también reduce la probabilidad de errores en el proceso de pasteurización, lo cual es crucial para garantizar la seguridad alimentaria en la industria láctea semi-industrial (22), (23).

Los resultados del ANOVA para los dos volúmenes analizados muestran un valor -p de 0.001896 y 0.006106 para los volúmenes de 150 y 250L correspondientemente. A partir de este análisis, se procedió a realizar un análisis de media, cuyos resultados se muestran en la Figura 4, como se observa, el uso del control automatizado minimiza las variaciones de temperatura a lo largo de toda la etapa de retención.

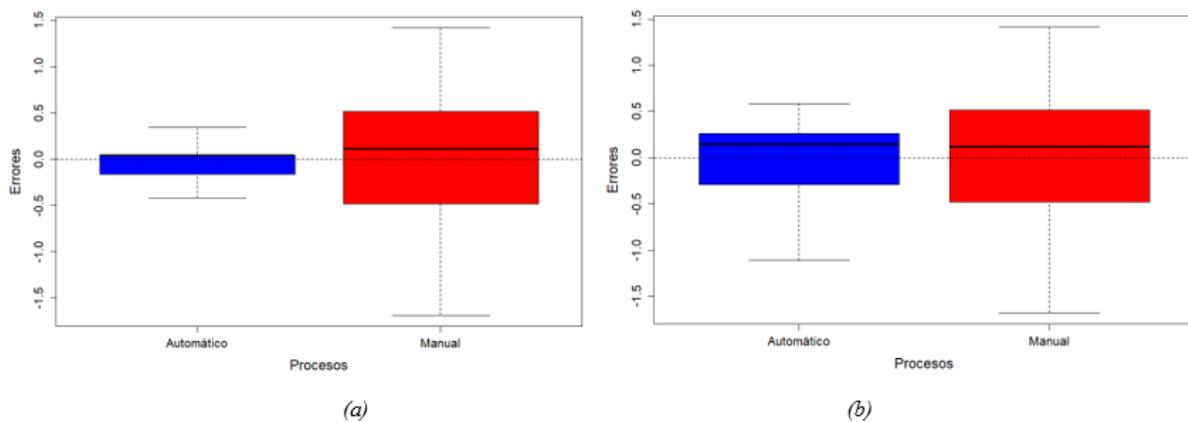


Figura 4. Análisis comparativo de errores de las medias en los procesos con control manual y automático durante la pasteurización.

DISCUSIÓN: Las gráficas de control revelan patrones distintivos en las curvas de temperatura de los procesos manual y automatizado de pasteurización lenta. En el sistema manual, se observa una mayor fluctuación en la temperatura a lo largo del tiempo, con picos y valles más pronunciados. Estas variaciones sugieren que los operarios realizan ajustes frecuentes para mantener la temperatura dentro del rango deseado (24). En contraste, la curva del sistema automatizado muestra una tendencia más suave y constante, con menos oscilaciones abruptas. Esta diferencia indica una mayor precisión en el control de temperatura del sistema automatizado, lo que podría traducirse en una pasteurización más uniforme y confiable.

La estabilidad y consistencia de ambos procesos se evidencian claramente en las gráficas de control y de medias. El sistema manual, aunque logra mantener la temperatura dentro de los límites aceptables, presenta una mayor variabilidad. Esta inconsistencia podría atribuirse a factores humanos como la fatiga, las distracciones o las diferencias en la técnica entre los operarios. Por otro lado, el sistema automatizado de bajo costo exhibe una notable estabilidad, manteniendo la temperatura más cerca del punto óptimo durante períodos prolongados (24). Esta consistencia en el proceso automatizado no solo mejora la calidad del producto final, sino

que también reduce la probabilidad de errores en el proceso de pasteurización, lo cual es crucial para garantizar la seguridad alimentaria en la industria láctea semi-industrial.

El análisis detallado de las gráficas de control permite identificar puntos críticos y anomalías en ambos sistemas. En el proceso manual, se observan ocasionales desviaciones significativas de la temperatura objetivo, particularmente durante los cambios de turno o en momentos de alta demanda productiva. Estas anomalías podrían comprometer la eficacia de la pasteurización en ciertos lotes(25). El sistema automatizado, aunque generalmente más estable, tampoco está exento de puntos críticos. Se detectan pequeñas fluctuaciones periódicas que podrían indicar la necesidad de calibración o mantenimiento del equipo. Además, en ambos sistemas se identifican puntos de inflexión en las curvas que corresponden a las fases de calentamiento y enfriamiento, siendo estos momentos críticos para asegurar la correcta eliminación de patógenos sin afectar excesivamente las propiedades organolépticas del producto lácteo (26).

El análisis comparativo de las medias de temperatura entre los sistemas de pasteurización lenta, tanto manual como automatizado y de bajo costo, revela diferencias significativas en el control térmico durante el proceso. Los datos obtenidos muestran que el sistema automatizado mantiene una temperatura media más estable y cercana al punto óptimo de pasteurización (63°C durante 30 minutos) en comparación con el método manual (20), (21), (23), (24). Esta diferencia se hace evidente en la menor variabilidad de las lecturas de temperatura a lo largo del tiempo de procesamiento, lo que sugiere un control más preciso y consistente por parte del sistema automatizado.

Las pruebas estadísticas aplicadas a los datos recopilados demuestran diferencias significativas entre ambos sistemas, lo que indica que las variaciones observadas no son producto del azar, sino que reflejan una verdadera diferencia en el rendimiento de los sistemas, esto se corrobora con los análisis estadísticos aplicados a los datos, que respaldan la hipótesis de que el sistema automatizado ofrece un control de temperatura más preciso y constante durante el proceso de pasteurización lenta.

Las diferencias observadas entre los sistemas manual y automatizado tienen implicaciones prácticas significativas para la industria láctea semi-industrial. Un control más preciso de la temperatura, como el logrado por el sistema automatizado, se traduce en una mayor garantía de seguridad alimentaria al asegurar que toda la leche alcance y mantenga la temperatura de pasteurización requerida (20). Esto reduce el riesgo de supervivencia de microorganismos patógenos y mejora la calidad microbiológica del producto final. Además, la menor variabilidad en la temperatura puede contribuir a preservar mejor las propiedades organolépticas y nutricionales de la leche, resultando en un producto de mayor calidad. Desde una perspectiva operativa, el sistema automatizado podría reducir la necesidad de supervisión constante, permitiendo que el personal se enfoque en otras tareas críticas del proceso productivo.

La precisión y fiabilidad de los sistemas de pasteurización son cruciales para garantizar la calidad y seguridad del producto lácteo. El sistema automatizado de bajo costo demuestra una mayor precisión en el mantenimiento de la temperatura objetivo, con fluctuaciones mínimas a lo largo

del tiempo de procesamiento. Esta consistencia se traduce en una mayor fiabilidad del proceso, reduciendo la probabilidad de errores humanos que podrían ocurrir en el sistema manual, especialmente durante operaciones prolongadas o en condiciones de fatiga del operador. Sin embargo, es importante señalar que la fiabilidad del sistema automatizado depende de la calidad de sus componentes y de un mantenimiento adecuado (27). Por otro lado, aunque el sistema manual puede ser menos preciso, ofrece la ventaja de una mayor flexibilidad y la capacidad de ajuste inmediato basado en la experiencia del operador. En última instancia, la elección entre ambos sistemas debe considerar no solo la precisión y fiabilidad, sino también factores como el volumen de producción, los recursos disponibles y las regulaciones locales de seguridad alimentaria.

El sistema automatizado de bajo costo para la pasteurización lenta presenta una serie de ventajas significativas sobre el método manual tradicional. En primer lugar, ofrece una mayor precisión y consistencia en el control de temperatura, lo que resulta crucial para garantizar la seguridad alimentaria y la calidad del producto final. Además, reduce la necesidad de supervisión constante por parte del personal, liberando recursos humanos para otras tareas importantes en el proceso productivo. Sin embargo, este sistema también conlleva algunas desventajas. La inversión inicial puede ser un obstáculo para pequeños productores, y existe una curva de aprendizaje asociada a la implementación y uso del nuevo equipo. Asimismo, la dependencia de componentes electrónicos introduce un nuevo punto de fallo potencial que requiere conocimientos técnicos específicos para su mantenimiento y reparación.

La eficiencia del control de temperatura es un aspecto clave en la pasteurización lenta, donde el sistema automatizado de bajo costo destaca por su eficacia. A diferencia del método manual, que depende de las habilidades del operador para mantener la temperatura en el rango óptimo, el sistema automatizado emplea sensores de alta precisión y algoritmos de control para ajustar de forma continua la temperatura del proceso. Esto genera una curva de temperatura más estable y precisa, minimizando fluctuaciones y desviaciones del punto de ajuste deseado. Los datos obtenidos demuestran que el sistema automatizado mantiene la temperatura dentro de un margen de error de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, en contraste con el método manual, que puede experimentar variaciones de hasta $\pm 2^{\circ}\text{C}$. Esta mejora en la precisión no solo optimiza la eliminación de patógenos, sino que también ayuda a preservar mejor las propiedades organolépticas y nutricionales de la leche.

La evaluación de la relación costo-beneficio del sistema automatizado de bajo costo sugiere una perspectiva positiva para su implementación en la industria láctea semi-industrial. Aunque la inversión inicial es superior a la del sistema manual, los beneficios a mediano y largo plazo son significativos (23), (28). El ahorro en mano de obra, la reducción de pérdidas por errores humanos y la mejora en la calidad y consistencia del producto final contribuyen a un retorno de inversión relativamente rápido. Estudios de caso en plantas piloto han evidenciado que el periodo de amortización puede variar entre 12 y 18 meses, según el volumen de producción (18), (21). Adicionalmente, la mayor eficiencia energética del sistema automatizado, resultado de un control más preciso de la temperatura, se traduce en ahorros adicionales en costos operativos. Es relevante señalar que estos beneficios económicos se acompañan de una mejora en la seguridad

alimentaria y la satisfacción del consumidor, factores que, aunque difíciles de cuantificar, son esenciales para el éxito y la sostenibilidad del negocio a largo plazo.

La implementación y mantenimiento del sistema automatizado de bajo costo para pasteurización lenta presentan tanto oportunidades como desafíos para la industria láctea semi-industrial. Estos sistemas están diseñados para ser relativamente sencillos de instalar y operar, con interfaces de usuario intuitivas que facilitan la transición desde métodos manuales. Sin embargo, una implementación exitosa requiere una planificación cuidadosa y, en algunos casos, ajustes en la infraestructura existente para integrar el nuevo equipo.

En términos de mantenimiento, el sistema automatizado generalmente demanda menos intervenciones diarias que el método manual, pero requiere un enfoque más técnico. Es fundamental establecer rutinas de mantenimiento preventivo y garantizar que el personal esté capacitado para llevar a cabo diagnósticos básicos y resolver problemas menores. Aunque esto pueda suponer un desafío inicial, a largo plazo contribuye a una operación más confiable y eficiente, reduciendo tiempos de inactividad y prolongando la vida útil del equipo.

Los resultados de este estudio comparativo destacan el potencial de los sistemas automatizados de bajo costo en la pasteurización lenta. La precisión y consistencia observadas en estos sistemas sugieren la viabilidad de desarrollar soluciones tecnológicas accesibles y eficientes para el control de la pasteurización. Esto podría desencadenar una nueva ola de innovación en la industria láctea semi-industrial, donde los fabricantes de equipos podrían concentrarse en diseñar sistemas más económicos, pero igualmente efectivos. La implementación de estos sistemas no solo podría mejorar la calidad del proceso y el producto, sino también reducir los costos operativos a largo plazo, haciendo que la automatización sea una opción viable incluso para productores de menor escala (27).

La adopción de sistemas automatizados de bajo costo para la pasteurización lenta promueve una mejora considerable en la calidad y seguridad de los productos lácteos. Al garantizar un control más preciso y constante de la temperatura durante todo el proceso, estos sistemas reducen el riesgo de sub-pasteurización, que podría permitir la supervivencia de patógenos dañinos, así como el riesgo de sobre-pasteurización, que podría comprometer las propiedades organolépticas y nutricionales del producto. Esta mayor consistencia en el proceso no solo asegura la eliminación eficaz de microorganismos nocivos, sino que también contribuye a preservar el sabor, la textura y los nutrientes de la leche. Como resultado, los consumidores disfrutarían de productos lácteos más seguros y de mejor calidad, mientras que los productores podrían experimentar una disminución en el número de lotes rechazados y un aumento en la vida útil de sus productos.

A pesar de los beneficios evidentes, la adopción de sistemas automatizados de bajo costo para la pasteurización lenta puede encontrar diversas barreras en la industria láctea semi-industrial. En primer lugar, aunque la inversión inicial es inferior a la requerida para sistemas más sofisticados, puede seguir siendo un obstáculo para pequeños productores con recursos limitados. Además, la resistencia al cambio y la falta de familiaridad con la tecnología entre los operadores tradicionales podrían dificultar la transición. Es probable que se requiera capacitación adicional para el

personal, lo que conlleva tiempo y costos. Otra barrera potencial radica en la percepción de que los métodos manuales son más "artesanales" y, por ende, superiores en algunos nichos de mercado. Finalmente, las regulaciones y certificaciones existentes pueden necesitar actualizaciones para integrar estos nuevos sistemas, lo que podría retrasar su implementación generalizada. Superar estas barreras requerirá esfuerzos coordinados entre fabricantes, educadores y reguladores para demostrar claramente los beneficios a largo plazo y facilitar la transición hacia esta tecnología accesible.

En el presente estudio, es fundamental reconocer ciertas limitaciones que podrían haber influido en los resultados obtenidos. Una de las principales consideraciones es la variabilidad inherente en la calidad de la leche utilizada, la cual puede fluctuar debido a factores estacionales o a la alimentación del ganado. Además, las condiciones ambientales en las que se llevaron a cabo los experimentos, como la temperatura y la humedad, podrían haber afectado sutilmente el proceso de pasteurización. Otro aspecto a tener en cuenta es la posible influencia del operador en el sistema manual, ya que la experiencia y habilidad individual podrían introducir variaciones en el proceso. Aunque se hizo un esfuerzo por controlar estos elementos, podrían constituir fuentes de sesgo en la comparación entre los sistemas manual y automatizado.

Aunque los resultados de este estudio proporcionan valiosas perspectivas sobre la eficacia comparativa de los sistemas de pasteurización lenta, manual y automatizado de bajo costo, es importante abordar con cautela la generalización de estos hallazgos. Las condiciones específicas de la planta láctea semi-industrial donde se realizó el estudio, incluyendo su escala de producción, equipamiento y prácticas operativas, podrían no ser representativas de todas las instalaciones similares. Adicionalmente, las variaciones regionales en la composición de la leche y las regulaciones locales sobre pasteurización podrían afectar la aplicabilidad directa de estos resultados en otros contextos geográficos. Por lo tanto, si bien este estudio ofrece una base sólida para la comparación, se recomienda considerar cuidadosamente las particularidades de cada entorno antes de extrapolar directamente estos hallazgos a otras instalaciones o regiones.

Este estudio abre interesantes oportunidades para futuras investigaciones en el campo de la pasteurización láctea. Una línea prometedora sería la realización de un estudio longitudinal que evalúe el impacto a largo plazo de ambos sistemas en la calidad del producto final y en la eficiencia energética de la planta. Asimismo, sería valioso llevar a cabo un análisis comparativo de costos-beneficios que incluya no solo la inversión inicial en equipamiento, sino también los costos operativos y de mantenimiento a lo largo del tiempo. Otra área de interés podría ser la investigación de cómo estos sistemas responden a diferentes tipos de leche (por ejemplo, leche de cabra o de oveja) o a volúmenes de producción variables, lo que proporcionaría una comprensión más amplia de su versatilidad y aplicabilidad en diversos escenarios de la industria láctea.

Se sugiere llevar a cabo un estudio multicéntrico que involucre varias plantas lácteas semi-industriales en diferentes regiones, lo que permitiría un mejor control de los factores ambientales y de variabilidad de la materia prima. En futuras etapas se planea implementar en la planta de producción, un análisis más detallado de la composición microbiológica de la leche antes y

después de la pasteurización, utilizando técnicas avanzadas de secuenciación genómica. Esto proporcionaría una comprensión más profunda de la efectividad de ambos sistemas en la eliminación de patógenos específicos. Por último, se recomienda explorar la integración de tecnologías de monitoreo en tiempo real y análisis de datos como las mostradas en esta investigación, lo que contribuiría a la detección temprana de desviaciones en la curva de temperatura.

CONCLUSIONES

El sistema de control de lazo cerrado basado en PLC para la regulación del proceso de pasteurización en la planta láctea de la UNACH se ha implementado con éxito. Incluye sensores de temperatura de alta precisión (termopares), actuadores electroneumáticos (válvulas solenoides) y sistemas de bombeo controlados por variadores de frecuencia (VFDs). La arquitectura de control utiliza un algoritmo PID optimizado para mantener con precisión los parámetros críticos del proceso.

El procedimiento implementado mediante la regulación térmica para el proceso de pasteurización ha demostrado una optimización cuantitativa del 80% en relación con las fluctuaciones globales originadas por los métodos de control convencional. Esto se ha logrado mediante la creación de una plataforma denominada Logo Web Editor, que facilita la interacción a través de una Interfaz Hombre-Máquina (HMI), permitiendo la parametrización de manera remota y el monitoreo en tiempo real de los parámetros operativos. De este modo, se ejemplifican aspectos clave de conectividad y accesibilidad de datos en el contexto de la Industria 4.0.

Además, en la comparación entre el control manual y el sistema automatizado mostró una mejora sustancial en los tiempos de calentamiento, enfriamiento y retención del proceso de pasteurización.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Castillo Director Ejecutivo Jorge García-Guerrero Subdirector General Darío Vélez J RA, Granda CE, Del Pozo Elizabeth Feijó S Cristhian Rosales C D V. Hacia la CIET 19: experiencias en el.
2. Martínez Ruiz. Inmovilización de antimicrobianos de origen natural y su aplicación en la industria alimentaria. [Valencia]: UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA ; 2020.
3. Garda MR. Técnicas del manejo de los alimentos. 2020 [cited 2024 Jul 29];309. Available from: <https://elibro.net/es/lc/utnorte/titulos/153615>
4. Bullón Black A, Stephanie S. Microbiological quality and prevalence of pathogens that cause foodborne diseases (ATS) in pasteurized and unpasteurized artisanal fresh cheese: Systematic Review Item Type info:eu-repo/semantics/bachelorThesis [Internet]. [Lima]: UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS; 2021 [cited 2024 Jul 29]. Available from: <http://hdl.handle.net/10757/656053>
5. Tulio M, Rincon A. PROPUESTA DE MEJORA DE PROCESOS EN UNA PLANTA DE LÁCTEOS

- MEDIANTE TRANSFORMACIÓN DIGITAL. 2024;
6. Garcia PM, López AF, Ons Á. LAS POLÍTICAS HACIA LA INVERSIÓN EXTRANJERA DIRECTA. 2021;
 7. León García OA. IMPLEMENTACIÓN DE LA INDUSTRIA 4.0 EN LAS PYMES, DRIVERS, BARRERAS E IMPACTO EN EL RENDIMIENTO EMPRESARIAL. Bogotá; 2021.
 8. Walas Mateo F. Industria 5.0. Inteligencia Artificial y Aprendizaje Automático para optimizar procesos industriales [Internet]. [Bueno Aires]: UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOMAS DE ZAMORA; 2023 [cited 2024 Jul 30]. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/373722726>
 9. Patel AD. DEVELOPMENT, SIMULATION AND PERFORMANCE ANALYSIS OF ROBUST MULTIPLE MODEL ADAPTIVE CONTROLLER EMPLOYING SOFT COMPUTING FOR POWER SYSTEM STABILIZATION. [GUJARAT, INDIA]: THE MAHARAJA SAYAJIRAO UNIVERSITY OF BARODA; 2015.
 10. Contreras Cáceres J de D, Puerto López KC. Vol. 4 Núm. 7 (2014). 2014 [cited 2024 Jul 30]. p. 32–42 SISTEMA SCADA PARA EL PROCESO DE PASTEURIZACION DE JUGOS. Available from: <https://www.fesc.edu.co/Revistas/OJS/index.php/mundofesc/article/view/20/64>
 11. Velasco Hernández A, En D. EVALUACIÓN DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS MODERADOS Y ALTAS PRESIONES HIDROSTÁTICAS SOBRE LA SEGURIDAD MICROBIOLÓGICA Y CALIDAD DE PULPA DE GUANÁBANA (*Annona muricata* L.). [Montecillo, Texcoco]: INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS; 2020.
 12. Álvarez Diaz JG, Armero Viveros JM, Urrutia CA. Control de temperatura en intercambiadores de calor tipo coraza-tubo: una revisión realizada a la industria. *Entre ciencia e ingeniería*. 2020;14(27):41–9.
 13. Angulo-Sogamoso KV, Gil-Sierra DG, Salcedo-Parra OJ. Optimización utilizando lógica difusa de dispositivo de análisis de componentes químicos de ingredientes naturales basados en el internet de las cosas IoT. *Revista Científica* [Internet]. 2017 Sep 1 [cited 2024 Aug 1];30(3):207–23. Available from: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/revcie/article/view/11586>
 14. Vargas AAA, Pañora LSO, Guadalupe JIA, Castelo JPC. Desarrollo de un sistema de control inteligente basado en redes neuronales aplicado al proceso de pasteurización de lácteos. *ConcienciaDigital* [Internet]. 2021 Jun 5 [cited 2024 Aug 1];4(2.2):40–57. Available from: <https://cienciadigital.org/revistacienciadigital2/index.php/ConcienciaDigital/article/view/1736>
 15. Polo Sandoval HM. Medición de temperatura de refrigeración y pasteurización con SENSOR DS18B20 y Termómetro de Mercurio. Universidad Nacional de Trujillo [Internet]. 2018 [cited 2024 Aug 1]; Available from: <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/1431017>
 16. Oviedo Gallegos MA, Segovia Ricaurte MD. OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE PASTEURIZACIÓN DE LA LECHE UTILIZANDO UN CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE PLC Y MONITOREO CON UN INTERFAZ HUMANO MÁQUINA HMI, CON FINES DE DESARROLLO TECNOLÓGICO Y DIDÁCTICO EN LA PLANTA DE LÁCTEOS DE LA ESTACIÓN EXPERIMENTAL TUNSHI – ESPOCH. [Riobamba]: ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO; 2016.

17. Rubino G. Pasteurizadores de leche Diseño, uso y mantenimiento. Segunda edicion. San Martin ; 2016.
18. Sullcahuamán Otero O. Diseño e implementación de un sistema de control para pasteurizar leche materna. 2017;
19. Trujillo Vallejo FR. Diseño e implementación de un sistema de control de temperatura generada por un caldero a diesel en el complejo turístico El Molino. QUITO/EPN/2014; 2014.
20. González Tinta VA, Armas Almeida LF. Diseño e implementación de un sistema automático para el proceso de pasteurización de leche. Quito: EPN, 2015.; 2015.
21. Crespo Vargas RI. Sistema automatizado para el proceso de pasteurización y cuajada de leche en la elaboración de queso fresco para el Consorcio de Lácteos Tungurahua. Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería en Sistemas ...; 2020.
22. Galindo Galindo ES. Diseño del Sistema Automatizado para las Etapas de Pasteurización e Hilado en el Proceso de Elaboración de Queso de la Empresa Del Altiplano Productos Lácteos del Municipio de Jenesano-Boyacá. Universidad Santo Tomás; 2021.
23. Cedeño M, Jarni A. Diseño y simulación de un sistema automatizado de las etapas de pasteurización e hilado mediante PLC para el proceso de elaboración de queso. La Libertad: Universidad Estatal Península de Santa Elena. 2024; 2024.
24. Torres Yto JC, León Villanueva RA. Diseño y simulación de un sistema de control para automatizar la línea de pasteurización de la Planta Lechera Laive-Arequipa. 2023;
25. Reinoso Montesdeoca JM. Propuesta de optimización de la Planta de Lácteos de la Asociación Agroartesanal de Productores de Lácteos Serafin Montesdeoca. 2023;
26. Ares MJV. Desarrollo del análisis de peligros y puntos de control crítico en explotaciones de vacuno lechero en Galicia: estudio epidemiológico de patógenos zoonóticos. Univ Santiago de Compostela; 2007.
27. CASANOVA FDEV, MARTÍN C. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN MEDIANTE PLC DE UNA PASTEURIZADORA DEL LABORATORIO DE ALIMENTOS PARA OPTIMIZAR LOS RECURSOS Y REALIZAR PRÁCTICAS DIRECTAS OBTENIENDO UN APRENDIZAJE SIGNIFICATIVO Y FUNCIONAL EN LAS FUTURAS GENERACIONES. 2013.
28. Cabrera Pozo KM. Diseño e implementación de un Sistema Scada para el Proceso de Pasteurización de Leche. La Libertad: Universidad Estatal Península de Santa Elena, 2017.; 2017.