

Artículo Original

***POSIBILIDADES DE MINIMIZACIÓN DEL CONSUMO DE AGUA
MEDIANTE MEJORAS EN LOS INTERCAMBIOS TÉRMICOS EN
PLANTA DE PRODUCTOS LÁCTEOS***

***POSSIBILITIES FOR MINIMIZING WATER CONSUMPTION BY HEAT
EXCHANGE IMPROVEMENTS IN A DAIRY PLANT***

Daniela Sosa Fernández^{1*} <https://orcid.org/0009-0006-8456-4488>

Erenio González Suárez¹ <https://orcid.org/0000-0001-5741-8959>

Dianeya Morales Arbolaez² <https://orcid.org/0000-0003-3914-117X>

¹ Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química y Farmacia, Universidad Central "Marta Abreu" de La Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

² Departamento de Ingeniería Hidráulica, Facultad de Construcciones, Universidad Central "Marta Abreu" de La Villas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Octubre 28, 2025; Revisado: Noviembre 6, 2025; Aceptado: Noviembre 25, 2025

RESUMEN

Introducción:

La industria láctea presenta una alta demanda de agua y energía, principalmente en los sistemas de intercambio de calor. En la Empresa de Productos Lácteos de Villa Clara, esto genera elevados costos, contaminación efluente y una amplia huella ambiental, comprometiendo su sustentabilidad.

Objetivo:

Determinar las mejores alternativas de operación de los sistemas de intercambio térmico para la reducción de los consumos de energía y agua.

Materiales y Métodos:

Se aplicó una metodología integral en cuatro etapas: 1) balances de masa y energía para cuantificar consumos; 2) diseño térmico de equipos mediante métodos establecidos y software de inteligencia artificial para cálculos iterativos; 3) desarrollo de sistemas de recuperación de condensados; y 4) optimización operativa ajustando gradientes térmicos.



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

* Autor para la correspondencia: Daniela Sosa, Email: dansosa1303@gmail.com



Esto permitió abordar sistemáticamente la minimización de agua y energía.

Resultados y Discusión:

Se demostró que es posible minimizar los insumos de agua mediante la utilización de temperaturas más bajas en los sistemas de enfriamiento y la recuperación de vapores condensados en los sistemas ya instalados.

Conclusiones:

El rediseño de equipos térmicos, el ajuste de temperaturas operativas y la recuperación de condensados demostraron ser estrategias efectivas para optimizar los procesos lácteos. Estas medidas permitieron mejoras significativas en la eficiencia energética y reducciones sustanciales en el consumo de agua, con ahorros del 12,5 % al 76,81 % en las diferentes líneas. Además, se recuperaron importantes volúmenes de condensado y energía térmica (hasta 847,33 kg/h y 573,7 kW), evidenciando el alto potencial de recursos que normalmente se desperdicia en procesos industriales convencionales.

Palabras clave: economía circular; indicadores dinámicos; optimización; pasteurizadora.

ABSTRACT

Introduction:

The dairy industry has a high demand for water and energy, primarily in heat exchange systems. At the Villa Clara Dairy Products Company, this results in high costs, effluent pollution, and a significant environmental footprint, compromising its sustainability.

Objective:

To determine the optimal operational alternatives for the thermal exchange systems to reduce energy and water consumption.

Materials and Methods:

An integrated methodology was applied in four stages: 1) mass and energy balances to quantify consumption; 2) thermal design of equipment using established methods and artificial intelligence software for iterative calculations; 3) development of condensate recovery systems; and 4) operational optimization by adjusting thermal gradients. This enabled a systematic approach to minimizing water and energy use.

Results and Discussion:

It was demonstrated that it is possible to minimize water inputs by using lower temperatures in cooling systems and recovering condensed vapors in the already installed systems.

Conclusions:

The redesign of thermal equipment, the adjustment of operating temperatures, and the recovery of condensates proved to be effective strategies for optimizing dairy processes. These measures led to significant improvements in energy efficiency and substantial reductions in water consumption, achieving savings ranging from 12.5% to 76.81% across the different production lines. Additionally, considerable volumes of condensate and thermal energy were recovered (up to 847.33 kg/h and 573.7 kW), highlighting the substantial resource potential that is typically wasted in conventional industrial processes.

Keywords: circular economy; dynamic indicators; optimization; pasteurizer.

1. INTRODUCCIÓN

La industria láctea constituye un sector fundamental en la seguridad alimentaria global, siendo un componente esencial de la dieta humana por su aporte de proteínas de alto valor biológico, calcio y vitaminas. Sin embargo, su operación enfrenta un desafío creciente al situarse en el epicentro de dos crisis globales interdependientes: la escasez de agua y la demanda energética. A nivel mundial, el consumo de agua se ha cuadruplicado durante el último siglo, con el 58% de la población afectada por escasez a principios del siglo XXI, una tendencia agravada por el cambio climático, el crecimiento poblacional y la expansión de la agricultura y la industria (Liu et al., 2024; Kummu et al., 2016). Este estrés hídrico global se refleja de manera particularmente intensa en la cadena de valor láctea, donde el procesamiento puede consumir entre 0,5 y 8,0 litros de agua por cada litro de leche producida, destacando las etapas de limpieza (CIP), pasteurización y enfriamiento como las de mayor intensidad.

La eficiencia hídrica industrial emerge como un paradigma crítico, definido como la combinación de tecnologías de tratamiento y reúso, rediseño de procesos, herramientas de decisión y políticas para reducir el consumo de agua y los vertidos sin sacrificar la productividad (Karkou et al., 2024). La literatura reciente converge en que la mejora de la eficiencia exige cerrar los bucles de agua, integrar la gestión del nexo agua-energía y aplicar herramientas avanzadas de modelado y soporte a la decisión (Schlei-Peters et al., 2018).

En el contexto específico de Cuba, estos desafíos se ven potenciados por una compleja combinación de factores estructurales, ambientales y económicos que actúan como determinantes clave de la eficiencia, tal como se ha observado en estudios de otros contextos industriales. Investigaciones aplicadas a la industria manufacturera colombiana han identificado que la inversión en tratamiento de aguas residuales, la reducción del consumo total de agua y los compromisos ambientales corporativos son factores decisivos para lograr un uso eficiente del agua (Henaó et al., 2024). Estos determinantes se intersectan con una dependencia histórica de combustibles fósiles importados, una infraestructura hídrica y energética que requiere modernización, y una creciente vulnerabilidad a fenómenos climáticos extremos como sequías severas, particularmente en cuencas críticas como la del río Cauto (Valido, 2025; Tran et al., 2024; Sardiñas, 2023). Esta situación limita severamente la capacidad de operación eficiente y sostenible de plantas como el Combinado Lácteo de Villa Clara en Santa Clara, donde un elevado e ineficiente consumo de agua en los sistemas auxiliares de intercambio de calor genera costos operativos excesivos y una huella ambiental ampliada, configurando un escenario donde la adopción de herramientas de soporte a la decisión (DSS) y la contabilidad y auditoría avanzada del agua podrían ser transformadoras (Lyu et al., 2023).

Ante esta problemática, la ingeniería de procesos ofrece herramientas fundamentales para la optimización. Los balances de masa y energía, basados en los principios de conservación de la materia y la primera ley de la termodinámica, constituyen la base para el análisis, diseño y mejora de sistemas industriales, permitiendo cuantificar flujos e identificar ineficiencias (Pritchard & Feroz, 2021). La aplicación rigurosa de estos balances es el primer paso indispensable para cualquier estrategia de optimización. Complementariamente, el dimensionamiento y optimización de los equipos de

transferencia de calor (como intercambiadores de placas y de doble tubo) mediante métodos avanzados que incluyen simulación computacional y algoritmos multiobjetivo, permiten maximizar la eficiencia térmica mientras se minimizan las pérdidas de presión y los consumos de servicios (Arsenyeva et al., 2023; Wang et al., 2019).

Dentro de las estrategias de eficiencia más efectivas y alineadas con la economía circular se encuentra la recuperación de condensados, una práctica que se enmarca directamente en la integración agua-energía (Water-Heat Nexus), (Castro et al., 2022). Esta integración destaca que las medidas aplicadas al agua, como la reutilización y la recuperación de calor de corrientes acuosas, impactan fuertemente en el consumo energético, y viceversa (Oliveira et al., 2022; Klemeš, 2012). La implementación de sistemas de recuperación de condensados conduce a ahorros energéticos y económicos sustanciales, reduce la demanda de agua desmineralizada y de combustible, y disminuye las emisiones contaminantes, mejorando simultáneamente la eficiencia global del sistema de vapor (Omran, 2024; Goodarzvand et al., 2023, Kovac, 2023). En consecuencia, el objetivo de esta investigación fue determinar las mejores alternativas de operación de los sistemas de intercambio térmico para la reducción de los consumos de energía y agua.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló siguiendo una metodología sistemática de análisis, diseño y evaluación, aplicada a las cuatro líneas de producción principales de la planta: leche pasteurizada, yogurt de soya, queso fresco y helado.

2.1. Recopilación de datos y balances de masa y energía

A partir de datos operativos recopilados en campo (temperaturas, flujos, composiciones y propiedades termofísicas), se desarrollaron modelos detallados de balances de masa y energía para cada equipo y para el proceso en su conjunto. Estos modelos fueron esenciales para localizar los puntos de mayor consumo y las pérdidas significativas. El balance de masa se basa en la ley de conservación de la materia, que establece que la masa no se crea ni se destruye en los procesos físicos o químicos, mientras que el balance de energía se fundamenta en la primera ley de la termodinámica, que asegura la conservación de la energía en sistemas cerrados (Fraga, 2015).

2.2. Diseño y optimización de intercambiadores de calor

El rediseño de los intercambiadores de calor se abordó con métodos termodinámicos estandarizados:

Intercambiadores de placas (líneas de leche y helado): Se implementó el método del Factor Térmico (Pérez, 2024). Este procedimiento iterativo parte de las propiedades termofísicas de los fluidos (calor específico, viscosidad, conductividad térmica) y las características geométricas de las placas (ángulo de corrugación, espaciamiento). El cálculo secuencial del número de Reynolds, los coeficientes de película (para los lados caliente y frío), el coeficiente global de transferencia de calor (U) y el número de unidades de transferencia (NTU) permitió determinar el área de intercambio exacta (A) necesaria. La iteración finalizó cuando el diseño convergió en un exceso de área inferior al 15%, equilibrando eficiencia y seguridad operativa, y evitando el subdimensionamiento. Las

placas seleccionadas, su número y la configuración de pasos se especifican en el catálogo Alfa Laval (Pérez, 2024).

Intercambiadores de doble tubo (línea de yogur de soya): El diseño se basó en el método de la Diferencia Media Logarítmica de Temperatura (DMLT). Se calcularon los coeficientes de convección para el flujo en el tubo interno y en el espacio anular, considerando el régimen de flujo (laminar o turbulento). El área total requerida se obtuvo a partir de la ecuación fundamental de transferencia de calor, incorporando un factor de obstrucción estándar para lácteos. Este cálculo permitió determinar el número exacto de horquillas en serie necesarias para cumplir con el deber térmico (Pérez & Pérez, 2019).

2.3. Dimensionamiento de la cuba quesera mediante inteligencia artificial

Para la línea de queso fresco, se dimensionó una nueva cuba de proceso que reemplazaría al equipo existente, el cual presenta un avanzado estado de deterioro. Su dimensionamiento y optimización se realizaron mediante un enfoque que integra principios fundamentales de ingeniería con herramientas de inteligencia artificial (IA). La metodología partió de consideraciones térmicas, mecánicas y sanitarias, partiendo del cálculo de dimensiones principales con una relación altura/diámetro óptimo de 1,5 para asegurar una agitación eficiente. Se determinó el volumen total considerando un factor de capacidad del 20% adicional al volumen operativo, y a partir de este se calcularon el diámetro y la altura del recipiente. Posteriormente, se realizaron balances de masa y energía para cuantificar los flujos de materiales y las demandas energéticas en las etapas de pasteurización, coagulación, cocción y enfriamiento. El diseño térmico incluyó el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor, el área mínima de transferencia requerida y la diferencia logarítmica de temperatura, junto con la verificación del flujo mediante el número de Reynolds y la estimación de pérdidas térmicas. Finalmente, se especificaron componentes mecánicos como la potencia del agitador, el espesor de las paredes y las válvulas de drenaje, asegurando que el equipo cumpliera con normativas sanitarias y operativas para la producción de queso fresco (DeepSeek, 2024).

2.4. Estrategia de recuperación de condensados

El estudio implementó una metodología sistemática para evaluar el potencial de recuperación de las corrientes de vapor condensado, actualmente descargadas al drenaje desde equipos como pasteurizadores y calderas. La investigación inició con una fase de caracterización, donde se cuantificaron los parámetros clave de cada corriente: su flujo másico y temperatura. A partir de estos datos, se calculó el potencial energético recuperable mediante un balance térmico, determinando la cantidad de calor contenida en el condensado. Posteriormente, se desarrolla el dimensionamiento hidráulico del sistema de recuperación, analizando la factibilidad técnica mediante la aplicación de principios fundamentales como la ecuación de Bernoulli y el cálculo de pérdidas por fricción y locales en la tubería, para garantizar su viabilidad operativa (Rosabal & Garcell, 2006).

2.5. Optimización de los parámetros operativos en sistemas de enfriamiento

La optimización de los parámetros operativos se centra en mejorar la eficiencia del agua de enfriamiento haciéndola trabajar desde una temperatura inicial más baja. En lugar de modificar la temperatura a la que el agua salía de los equipos, la estrategia consistió en

enfriar más el agua antes de que ingresara al sistema. Al introducir agua a una temperatura menor, su capacidad para absorber calor del proceso aumentó significativamente. Esto permitió que la misma cantidad de energía fuera removida utilizando un volumen sustancialmente menor de agua, ya que cada litro, al estar más frío, podía capturar más calor antes de alcanzar su temperatura límite de salida.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Dimensionamiento de los intercambiadores de calor en la línea de pasteurización de leche

El proceso de producción de leche pasteurizada integra múltiples etapas para garantizar la seguridad y calidad del producto. Para un flujo de 10000 L/h (dato operacional proporcionado por el Combinado Lácteo de Villa Clara), se cuantificaron las corrientes de proceso en cada etapa, considerando condiciones adiabáticas. Los intercambiadores de calor de placas se diseñaron mediante el método del factor térmico (Pérez, 2024), mediante un proceso iterativo que permitió optimizar el área de transferencia, los coeficientes globales (U) y el número de placas, cuyo resultado se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Resultados del dimensionamiento de los intercambiadores de calor

<i>Intercambiador de calor</i>	<i>Calor transferido (kW)</i>	<i>A_t (m²)</i>	<i>Área en exceso (A_d/A₀)</i>
Cortina de enfriamiento	111,71	26,23	8,9 %
<i>Pasteurizador</i>			
1	573,699	14,28	15 %
2	766,48	43,66	6,2 %
3	77,83	3,45	11,3 %

Los resultados muestran que el dimensionamiento de los intercambiadores de calor, mediante el método del factor térmico, ha sido eficiente, con excesos de área inferiores al 15 % en todos los casos. Esto indica un equilibrio adecuado entre la capacidad de transferencia térmica y la seguridad operativa, evitando tanto el sobredimensionamiento innecesario como el riesgo de subdimensionamiento. El pasteurizador 2 presenta el área más grande (43,66 m²) debido a su mayor carga térmica, mientras que el intercambiador 3, con un área menor, sigue cumpliendo su función con un exceso del 11,3%, lo que confirma la robustez del diseño.

3.1.1. Recuperación del condensado

El estudio propone la implementación de un sistema integral de recuperación de condensado en el proceso de pasteurización de leche (tabla 2), con el objetivo de mejorar la eficiencia energética de la planta. La infraestructura técnica necesaria incluye un tanque de condensado de 200 L de acero inoxidable para la recolección primaria, conectado mediante una red de tuberías aisladas de 1" de diámetro (acero inoxidable AISI 304) a un tanque de caldera de 5000 L, ubicado a 4 m de altura y a una distancia de 100 m. El sistema se completa con accesorios esenciales para su operación, como 10 codos de 90° y 2 válvulas de tiro rápido, y se automatiza mediante sistemas de control que incorporan

válvulas termostáticas y sensores de temperatura. Los componentes clave a recuperar son el condensado de vapor, consistente en agua de alta calidad a una temperatura entre 90 y 95°C, y su valiosa energía térmica residual, recursos que serán reintegrados directamente a la caldera o utilizados en procesos secundarios de precalentamiento.

Tabla 2. Resultados de recuperación del condensado en la pasteurización de la leche

<i>Aspecto</i>	<i>Resultados</i>	<i>Beneficios</i>
Energía recuperada	2065317,1 kJ/h (equivalente a 573,7 kW) en la primera sección del pasteurizador	Reduce el consumo de energía en la caldera al reutilizar el calor residual
Condensado recuperado	847,33 kg/h	Disminuye el consumo de agua nueva y costos asociados
Altura de bombeo calculada	46,88 m	Sistema eficiente y equilibrado operativamente
Impacto ambiental	Menor descarte de agua caliente y reducción de emisiones por menor uso de combustible	Contribuye a prácticas industriales sostenibles

La recuperación de condensado en la pasteurización de leche demuestra un potencial significativo para mejorar la eficiencia energética y reducir el consumo de recursos. La energía recuperada (2065317,1 kJ/h) equivale a una reducción directa en la demanda de combustible de la caldera, mientras que el caudal de condensado recuperado (847,33 kg/h) disminuye la necesidad de agua fresca.

3.1.2. Optimización de las temperaturas para reducir el flujo de agua

Para reducir el consumo de agua sin afectar la transferencia de calor, se propone disminuir la temperatura de entrada del agua fría mediante tres medidas: mejorar el aislamiento de tuberías, utilizar torres de enfriamiento e implementar sistemas de refrigeración más eficientes. Los resultados cuantitativos de estas mejoras, aplicadas a los sistemas de enfriamiento de la línea de pasteurización de leche, se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Resultado del ajuste de temperaturas en la pasteurización de la leche

<i>Parámetro</i>	<i>Situación actual</i>	<i>Propuesta optimizada</i>
<i>Cortina enfriamiento</i>		
Temperatura entrada (°C)	2	1
Temperatura salida (°C)	9	9
Flujo (kg/h)	14 725,71	12 885 (12,5%)
<i>Pasteurizador S3</i>		
Temperatura entrada (°C)	2	1
Temperatura salida (°C)	5,5	5,5
Flujo (kg/h)	19 121,89	14 873,25 (22,2%)

La optimización de las temperaturas de entrada del agua de enfriamiento permite reducir el flujo de agua sin comprometer la eficiencia térmica. En la cortina de enfriamiento, una

reducción de 1 °C en la temperatura de entrada genera un ahorro del 12,5 % en el consumo de agua. En el pasteurizador S3, el ajuste similar produce una reducción del 22,2 %. Estos resultados confirman que pequeñas mejoras en los sistemas auxiliares de enfriamiento, como las torres de enfriamiento, pueden lograr ahorros hídricos sustanciales.

3.2. Dimensionamiento del intercambiador de calor en la línea del yogurt de soya

Para garantizar un proceso térmico eficiente en la producción de yogurt de soya, se dimensiona un intercambiador de calor de doble tubo, encargado de enfriar la leche de soya pasteurizada desde 135 °C hasta 50 °C, basados en el método de DMLT, considerando las propiedades termo-físicas de los fluidos y los requerimientos sanitarios de la industria láctea. Los resultados se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Resultados del dimensionamiento del intercambiador de calor de la línea del yogurt de soya

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
Calor transferido	394 485	W
LMTD	44,93	°C
Coefficiente interno (leche)	586 248	W/m ² °C
Coefficiente externo (agua)	554,53	W/m ² °C
Coefficiente global limpio	501,79	W/m ² °C
Coefficiente global sucio	406,51	W/m ² °C
Área de transferencia requerida	20,60	m ²
Longitud total de tubos	182,20	m
Número de horquillas	18	-
Factor de obstrucción calculado	0,00047	m ² °C/W
Margen de seguridad (% área extra)	32,43 %	-

Con el dimensionamiento del intercambiador de calor a las temperaturas de trabajo actuales de la fábrica, se obtiene un área en exceso de 32,43 %. Esto es favorable porque permite procesar mayores flujos de materia prima para garantizar mayores producciones, extender los ciclos de limpieza y reducir la velocidad de los fluidos para lograr la misma transferencia de calor, disminuyendo la pérdida de carga y el consumo de energía en bombas.

3.2.1. Optimización de las temperaturas de enfriamiento para reducir el consumo de agua sin afectar la calidad del producto

El siguiente resumen (tabla 5) compara el proceso actual de enfriamiento con una propuesta optimizada que ajusta temperaturas clave, lo que permite reducir el consumo de agua en un 67,3 %. Este resultado es coherente con lo reportado en la literatura especializada, donde se señala que incrementos moderados en el gradiente térmico (ΔT) del agua de enfriamiento pueden generar reducciones significativas en su consumo, manteniendo los estándares de pasteurización y enfriamiento establecidos para productos lácteos. Los cambios implementados se enfocan en maximizar la eficiencia térmica del intercambiador de calor y el tanque fermentador, mediante la disminución de la

temperatura de entrada del agua de 28 °C a 20 °C, lo que eleva el ΔT operativo de 27 °C a 35 °C. Esta estrategia, ampliamente documentada en estudios de optimización energética en la industria láctea, permite transferir la misma carga térmica con un flujo sustancialmente menor de agua, tal como se ha implementado en plantas líderes del sector para mejorar la sostenibilidad hídrica sin comprometer la inocuidad del producto.

Tabla 5. Resultados del Ajuste de las temperaturas para reducir el consumo de agua

<i>Parámetros</i>	<i>Situación actual</i>	<i>Propuesta optimizada</i>	<i>Reducción</i>
Temperatura entrada (°C)	28	20	
Temperatura salida (°C)	55	55	
ΔT (°C)	27	35	
Flujo (kg/s)	3,49	1,14	67,3%

Se logró una reducción del 67,3 % en el consumo de agua para el enfriamiento del yogur de soya al disminuir la temperatura de entrada del agua de 28 °C a 20 °C, aumentando así el gradiente térmico efectivo (ΔT) de 27 °C a 35 °C. Este resultado demuestra que optimizar el ΔT operativo es una estrategia altamente eficaz para minimizar el uso de recursos hídricos, manteniendo los estándares de calidad y seguridad del producto.

3.2.2. Recuperación del condensado

El proyecto plantea implementar un sistema de recuperación de vapor condensado en la planta de yogurt de soya para mejorar la eficiencia energética y reducir costos (tabla 6). Actualmente, el condensado de equipos como calefactores y tanques Flash se desperdicia, representando una pérdida significativa de recursos energéticos.

Tabla 6. Resultados de la recuperación del condensado

<i>Aspecto evaluado</i>	<i>Resultado</i>	<i>Unidad</i>
Condensado recuperado	514,8	kg/h
Energía térmica recuperada	306,83	kW
Altura de bombeo (Hb)	3,57	M

La recuperación de condensado en la línea de yogurt de soya permite aprovechar 514,8 kg/h de agua de alta calidad y 306,83 kW de energía térmica, que de otro modo se perderían.

3.3. Dimensionamiento de la cuba quesera

El diseño térmico-operativo propuesto influirá directamente sobre el sistema actual (deteriorado y poco eficiente) al reducir significativamente las pérdidas de calor mediante un aislamiento reforzado, recuperar el vapor condensado para reutilizar tanto su energía como el agua contenida, y automatizar el control de temperatura. Esto permitirá disminuir el consumo de vapor y agua de reposición, acortar los tiempos de calentamiento y mejorar la eficiencia energética global, sin modificar las dimensiones físicas de las cubas existentes y manteniendo los estándares de calidad y producción.

La tabla 7 integra los parámetros clave para el diseño de la cuba quesera, combinando requisitos de proceso, propiedades de materiales y especificaciones técnicas.

Tabla 7. Dimensionamiento de cuba quesera

<i>Parámetros para el diseño</i>	<i>Resultados</i>
Carga térmica	1 671 303 kJ
Área mínima de transferencia	10,6 m ²
Volumen de trabajo	4500 L
Diámetro interno (D)	1,56 m
Altura cilíndrica (H)	2,34 m
Potencia del agitador	4,2 kW

Los resultados del dimensionamiento térmico-operativo de la cuba quesera muestran un diseño equilibrado y eficiente, adecuado para la producción de queso fresco en la planta láctea. La carga térmica calculada refleja la energía requerida para el proceso de calentamiento y mantenimiento de temperatura, lo cual es fundamental para garantizar la pasteurización y coagulación de la leche. El área mínima de transferencia de calor determinada asegura una superficie suficiente para una transmisión térmica efectiva, optimizando los tiempos de proceso y reduciendo las pérdidas energéticas.

Las dimensiones geométricas propuestas (diámetro interno de 1,56 m y altura cilíndrica de 2,34 m) corresponden a un volumen de trabajo de 4500 L, adecuado para la capacidad de producción objetivo y con una relación altura-diámetro ($H/D \approx 1,5$) que favorece la mezcla eficiente y la uniformidad térmica. La potencia del agitador (4,2 kW) se dimensionó para garantizar una homogeneización adecuada del contenido sin generar esfuerzos cortantes excesivos que pudieran afectar la textura del queso.

3.3.1. Recuperación del condensado

Este estudio evalúa el sistema de recuperación de vapor condensado en la producción de queso fresco, enfocado en optimizar el aprovechamiento energético y reducir pérdidas.

Tabla 8. Resultados del sistema de recuperación de condensado

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
Masa de condensado (m)	244,5	kg/lote
Energía recuperada (Q)	144,9	kW
Altura de bombeo	4,42	m

Se recuperan 244 kg por lote (145 kW). Aunque es por lotes y la cantidad parece menor, en un día de producción se acumula un ahorro importante. El condensado se puede usar para calentar la leche al inicio o para el agua de lavado, lo que acorta los ciclos y ahorra energía.

3.4. Dimensionamiento del intercambiador de calor en la línea del helado

El diseño del intercambiador de placas para la línea de helado consideró las características específicas del proceso, donde el control preciso de temperaturas es fundamental para la

calidad del producto.

Esta tabla presenta los principales resultados del dimensionamiento térmico del intercambiador de placas.

Tabla 9. Resultados del dimensionamiento del intercambiador de calor en la línea del helado

<i>Parámetros para el diseño</i>	<i>Resultados</i>
MLDT	10,82
Calor transferido	143 570 W
Número de placas térmicas (Np)	69
Número total de canales (Nc)	70
Número de canales paralelos por paso (np)	7
Numero de pasos (n)	5/5
Área necesaria para la transferencia de calor	4,66 m ²
Área disponible	5,17 m ²
Exceso de área	10,9%

Los resultados del diseño del intercambiador de placas para helado presentan un exceso de área del 10,9 %, lo que asegura flexibilidad operativa ante variaciones de carga o posibles incrustaciones. La configuración de pasos y canales optimiza la transferencia térmica, garantizando un enfriamiento eficiente y uniforme del producto final.

3.4.1. Optimización de las temperaturas de enfriamiento

La optimización térmica del proceso de helado permitió ajustar las temperaturas de operación manteniendo la calidad del producto mientras se reduce significativamente el consumo de agua (tabla 10).

Tabla 10. Ajuste de temperaturas en el intercambiador de placas

<i>Parámetro</i>	<i>Valor original</i>	<i>Valor modificado</i>	<i>Beneficio</i>
Temperatura de entrada del agua	20°C	15°C	Aumenta eficiencia de enfriamiento
Temperatura de salida del agua	45°C	45°C	Reduce flujo de agua requerido
Flujo de agua requerido	4938 kg/h	1144,9 kg/h	Ahorro del 76,81 %
Temperatura post-ICP (mezcla)	25°C	25°C	Calidad del producto garantizada

3.4.2. Recuperación del condensado

Este estudio propone un sistema de recuperación de vapor condensado en la línea de producción de helado para mejorar la eficiencia energética y reducir el consumo de agua (tabla 11).

Tabla 11. Recuperación de condensados

<i>Parámetro</i>	<i>Valor con recuperación</i>
Caudal de condensado	427,84 kg/h
Energía recuperable	268 kW
Altura de bombeo (Hb)	22,1 m

Se recuperan 428 kg/h de condensado (268 kW). Este ahorro es clave porque la pasteurización del helado requiere mucho vapor. Al reutilizar el condensado, se reduce la necesidad de generar vapor nuevo.

4. CONCLUSIONES

1. El estudio determinó que la alternativa de operación más efectiva para reducir el consumo de agua en los sistemas de intercambio de calor es la implementación de una torre de enfriamiento, aprovechando así la infraestructura disponible para disminuir la temperatura de entrada del agua de enfriamiento.
2. El redimensionamiento de los intercambiadores de calor mediante metodologías termodinámicas estandarizadas permitió optimizar su eficiencia térmica, asegurando un exceso de área que garantiza la operación sin subdimensionamiento.
3. Los ajustes en las temperaturas de operación permitieron reducir el consumo de agua en todas las líneas: 12,5 % en la cortina de enfriamiento, 22,2 % en el pasteurizador de leche, 67,3 % en el yogur de soya y 76,81 % en la línea de helado.
4. La implementación de sistemas de recuperación de condensados permitió recuperar volúmenes considerables de agua y energía térmica: 847,33 kg/h en la pasteurización de leche, 514,8 kg/h (306,83 kW) en la línea de yogur de soya, 244,5 kg por lote en la producción de queso y 427,84 kg/h en la línea de helado.

REFERENCIAS

- Arsenyeva, O., Tovazhnyanskyy, L., Kapustenko, P., Klemeš, J. J., & Varbanov, P. S. (2023). Revisión de los avances en la mejora de la transferencia de calor de intercambiadores de calor de placas para aplicaciones monofásicas en industrias de proceso. *Energies*, 16(13), 4976. <https://doi.org/10.3390/en16134976>
- Castro, M., Iten, M., & Matos, H. A. (2022). Revisión sobre la integración de agua y energía en la industria de procesos: Nexo agua-calor. *Sustainability*, 14 (13), 7954. <https://doi.org/10.3390/su14137954>
- Fraga, E. (2015). *Chapter 1: Process Analysis – The Importance of Mass and Energy Balances*, In: Concepts of Chemical Engineering 4 Chemists. RSC Publishing. <https://doi.org/10.1039/9781847557674-00001>
- Goodarzvand, F., Samiee, L., & Rahmadian, N. (2023). Energy savings from flash steam recovery: an industrial case study. *Energy Conversion and Management: X*, 19, 100393. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2023.100393>
- Henao, C., Lis-Gutiérrez, J. P., Lis-Gutiérrez, M., & Ariza-Salazar, J. (2024). Determinants of efficient water use and conservation in the Colombian manufacturing industry using machine learning. *Humanities and Social Sciences*

- Communications*, 11, 2. <https://doi.org/10.1057/s41599-023-02524-x>
- Karkou, E., Teo, C., Savvakis, N., Poinapen, J., & Arampatzis, G. (2024). Industrial circular water use practices through the application of a conceptual water efficiency framework in the process industry. *Journal of Environmental Management*, 370, 122596. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122596>
- Kovac, A. (2023). The reuse of water and steam utilities by using the integrated fork technique and the complete circular economy. *Results in Engineering*, 20, 101497. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101497>
- Kummu, M., Guillaume, J., Moel, H., Eisner, S., Flörke, M., Porkka, M., Siebert, S., Veldkamp, T., & Ward, P. (2016). The world's road to water scarcity: shortage and stress in the 20th century and pathways towards sustainability. *Scientific Reports*, 6, 38495. <https://doi.org/10.1038/srep38496>
- Liu, J., Li, D., Chen, H., Wang, H., Wada, Y., Kummu, M., Gosling, S., Yang, H., Pokhrel, Y., & Ciais, P. (2024). Timing the first emergence and disappearance of global water scarcity. *Nature Communications*, 15, 7129. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-51302-z>
- Lyu, F., Zhang, H., Dang, C., & Gong, X. (2023). A novel framework for water accounting and auditing for efficient management of industrial water use. *Journal of Cleaner Production*, 395, 136458. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136458>
- Omran, I. (2024). Importance of Condensate Recovery in Industrial Operations "AMOC CASE". *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 9(9), 2618-2628. <https://doi.org/10.38124/ijisrt/ijisrt24sep1287>
- Pérez, A. (2024). *Análisis de costos y rentabilidad de la planta de pasteurización de leche en la empresa de productos lácteos la Villareña*. [Trabajo de Diploma, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba]. 78-80. <https://dspace.uclv.edu/cu/handle/123456789/20388>
- Pérez, A., & Pérez, E. J. (2019). Diseño térmico de un intercambiador de calor de doble tubo para el enfriamiento de acetona. *Nexo Revista Científica*, 32(2), 150–165. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7317090.pdf>
- Pritchard, D., & Feroz, S. (2021). *Mass and Energy Balancing: Calculations for Plant Design*. Editorial CRC Press (Taylor & Francis Group). https://books.google.com/cu/books/about/Mass_and_Energy_Balancing.html?id=LmIbzgEACAAJ&redir_esc=y
- Rosabal, J., & Garcell, L. (2006). Hidrodinámica y separaciones mecánicas. Editorial Félix Varela.
- Sardiñas, E. (2023). Ley Energética Cubana y la Transición Energética Verde. *Documento de trabajo sobre la Ley de Graz n.º 04*, 1-15. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4372069>
- Schlei-Peters, I., Wichmann, M., Matthes, I., Gundlach, F., & Spengler, T. (2018). Integrated Material Flow Analysis and Process Modeling to Increase Energy and Water Efficiency of Industrial Cooling Water Systems. *Journal of Industrial Ecology*, 22(1), 49–63. <https://doi.org/10.1111/jiec.12540>
- Tran, A.P., Tran, B., Campbell, S., Nguyen, N., Tran, D., Nguyen, T., Nguyen, A., & Duong, H. (2024). Spatio-temporal characterization of drought variability in data-scarce regions using global precipitation data: a case study in Cauto river basin,
-

- Cuba. *Scientific Reports*, 14, 11659. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61709-9>
- Valido, J. (2025). The hegemonic order in water management as a guarantee of the unequal access to the resource in Cuba. *Southern perspective*, 3(43), 1-11. <https://doi.org/10.56294/pa202543>
- Wang, W., Zhang, Y., Lee, K., & Li, B. (2019). Optimal design of a double pipe heat exchanger based on the outward helically corrugated tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 135, 706-716. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.01.115>

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- Ing. Daniela Sosa Fernández. Conceptualización, metodología, investigación, visualización, redacción – primera redacción.
 - Dr.Sc. Erenio González Suárez. Supervisión, validación, gestión de proyectos, recursos, redacción - revisión y edición.
 - Dianeya Morales Arboláez. Redacción - revisión y edición.
-