



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Agronòmica i del Medi Natural

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica
y del Medio Natural

SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE
PASTEURIZACIÓN DE LA LECHE

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ciencia y Tecnología de los Alimentos

AUTOR/A: Gozábez Catalá, Ignacio

Tutor/a: Bon Corbín, José

CURSO ACADÉMICO: 2025/2026

RESUMEN

En este trabajo se ha desarrollado una simulación y posterior optimización de un pasteurizador de leche entera basado en un intercambiador de calor por placas en el que interactúan un fluido caliente (agua) y otro frío (leche). Para la fase de simulación se ha utilizado el software COMSOL Multiphysics, y para la optimización del sistema se ha empleado MATLAB. El objetivo principal ha sido mejorar la eficiencia energética del proceso, logrando alcanzar las temperaturas requeridas para la pasteurización con el menor consumo térmico posible. Se han aplicado criterios de optimización térmica y análisis de transferencia de calor, mostrando mejoras significativas en el rendimiento del intercambiador. Este estudio contribuye a la mejora de procesos térmicos dentro del ámbito de la industria alimentaria.

PALABRAS CLAVE

Pasteurizador; Intercambiador de calor; Proceso; Temperatura; Ecuación

RESUM

En este treball s'ha desenvolupat una simulació i posterior optimització d'un pasteuritzador de llet sencera basat en un bescanviador de calor per plaques en el qual interactuen un fluid calent (aigua) i un altre fred (llet). Per a la fase de simulació s'ha utilitzat el programari COMSOL Multiphysics, i per a l'optimització del sistema s'ha emprat MATLAB. L'objectiu principal ha estat millorar l'eficiència energètica del procés, aconseguint aconseguir les temperatures requerides per a la pasteurització amb el menor consum tèrmic possible. S'han aplicat criteris d'optimització tèrmica i anàlisi de transferència de calor, mostrant millores significatives en el rendiment del bescanviador. Este estudi contribuïx a la millora de processos tèrmics dins de l'àmbit de la indústria alimentària.

PARAULES CLAU

Pasteuritzador; Bescanviador de calor; Procés; Temperatura; Equació

SUMMARY

In this work, a simulation and subsequent optimization of a whole milk pasteurizer based on a plate heat exchanger was developed, in which a hot fluid (water) and a cold fluid (milk) interact. COMSOL Multiphysics was used for the simulation phase, and MATLAB was used for system optimization. The main objective was to improve the energy efficiency of the process, achieving the temperatures required for pasteurization with the lowest possible heat consumption. Thermal optimization criteria and heat transfer analysis were applied, showing significant improvements in the exchange rate's performance. This study contributes to the improvement of thermal processes within the food industry.

KEY WORDS

Pasteurizer; Heat exchanger; Process; Temperature; Equation

ÍNDICE

1. Relación con los ODS

2. Nomenclatura

3. Introducción

3.1 Contexto del proceso de pasteurización

3.2 Motivación e interés del estudio

3.3 Marco Teórico

3.3.1 Principios de pasteurización de la leche

3.3.2 Revisión de estudios similares

3.3.2.1 Simulation and optimization of milk pasteurization
processes using a general process simulator

3.3.2.2 Dynamic simulator and model predictive control of a milk
pasteurizer

4. Objetivos del Trabajo

5. Materiales y métodos

5.1 Modelo matemático del proceso de pasteurización

5.1.1 Diagrama de simulación

5.1.2 Descripción y justificación del intercambiador de calor

5.1.3 Desarrollo del modelo

5.1.3.1 Ecuaciones de Gobierno

5.1.3.1.1 Ecuaciones de Gobierno de la Placa

5.1.3.1.2 Ecuaciones de Gobierno del Fluido

5.1.3.2 Condiciones de Contorno

5.1.3.3 Relaciones subsidiarias

5.1.3.3.1 Coeficiente individual de Transferencia de Calor

5.1.3.3.2 Propiedades físico-térmicas de los fluidos

5.2 Simulación del proceso de pasteurización

5.3 Optimización del proceso de pasteurización

5.3.1 Función Objetivo

5.3.2 Variables Decisorias

5.3.3 Restricciones

5.3.4 Herramientas de cálculo

6. Resultados y discusión

6.1 Resultados de la simulación térmica

6.1.1 Estructuración de la simulación

6.1.2 Proceso de pasteurización

6.1.2.1 Resultados del Intercambiador de Calor 2

6.1.2.2 Resultados del Intercambiador de Calor 1

6.1.2.3 Resultados del Intercambiador de Calor 3

6.2 Resultados de la optimización

6.2.1 Método de optimización

6.2.2 Optimización del proceso

6.2.2.1 Optimización 1

6.2.2.2 Optimización 2

6.2.2.3 Optimización 3

6.2.3 Valores obtenidos tras la solución al problema de optimización

6.3 Discusión de los resultados

6.3.1 Impacto de la optimización

6.3.2 Limitaciones identificadas

6.3.3 Comparación de los resultados con los artículos de interés

6.3.4 Reflexión sobre el estudio

6.3.5 Implicaciones prácticas

7. Conclusiones

8. Bibliografía

9. Anexos

9.1 Interconexión MATLAB-COMSOL

9.2 Cálculo del coeficiente global de Transferencia de Calor por convección

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: Grado de relación del trabajo con los ODS.

TABLA 2: Códigos de nomenclatura y definiciones.

TABLA 3: Subíndices, supra índices y subíndices dobles.

TABLA 4: Principales microorganismos a inactivar en la pasteurización de la leche.

TABLA 5: Composición de la leche entera (UHT) por 100mL de producto.

TABLA 6: Definición gráfica de los elementos presentes en el diagrama de simulación.

TABLA 7: Parámetros físico-estructurales del intercambiador de calor.

TABLA 8: Valores de entrada en la optimización

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1: Diagrama de simulación del pasteurizador.

FIGURA 2: Elemento diferencial en una placa (placa i).

FIGURA 3: Balance energético en el elemento diferencial de la placa.

FIGURA 4: Representación de la circulación a contracorriente.

FIGURA 5: Representación del volumen de control diferencial en la dirección negativa de X.

FIGURA 6: Representación del volumen de control diferencial en la dirección positiva de X.

FIGURA 7: Geometría del sistema para la simulación.

FIGURA 8: Espesor y longitud de una placa.

FIGURA 9: Contorno asignado al primer canal del intercambiador.

FIGURA 10: Malla empleada para una placa.

FIGURA 11: Evolución de la Temperatura de la leche en el intercambiador 2.

FIGURA 12: Evolución de la Temperatura del agua en el intercambiador 2.

FIGURA 13: Evolución de la Temperatura del fluido frío en el intercambiador 1.

FIGURA 14: Evolución de la Temperatura del fluido caliente en el intercambiador de calor 1.

FIGURA 15: Evolución de la Temperatura del agua en el intercambiador 3.

FIGURA 16: Evolución de la Temperatura de la leche en el intercambiador 3.

FIGURA 17: Valor de función por iteración en la optimización 1.

FIGURA 18: Valor de función por iteración en la optimización 2.

FIGURA 19: Inicialización del servidor.

FIGURA 20: Conexión al servidor desde MATLAB.

ÍNDICE DE BLOQUES DE CÓDIGO

Bloque de código 1: Ejecución y simulación del proceso.

Bloque de código 2: Optimización del proceso.

1.RELACIÓN CON LOS ODS

Tabla 1

Grado de relación del trabajo con los ODS.

OBJETIVO DE DESARROLLO SOSTENIBLE	GRADO DE RELACIÓN			
	Alto	Medio	Bajo	No procede
ODS 1. Fin de la pobreza		■		
ODS 2. Hambre cero	■			
ODS 3. Salud y bienestar		■		
ODS 4. Educación de calidad		■		
ODS 5. Igualdad de género				■
ODS 6. Agua limpia y saneamiento			■	
ODS 7. Energía asequible y no contaminante	■			
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico			■	
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras		■		
ODS 10. Reducción de las desigualdades				■
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles				■
ODS 12. Producción y consumo responsables	■			
ODS 13. Acción por el clima		■		
ODS 14. Vida submarina				■
ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres				■
ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas				■
ODS 17. Alianzas para lograr objetivos				■

Según se muestra en la tabla 1, el proyecto que se ha llevado a cabo tiene un alto grado de relación con tres objetivos de desarrollo sostenible:

- a) ODS 2 “Hambre Cero” (Naciones Unidas, 2015a): Aunque el título de este objetivo de desarrollo sostenible hace referencia a la erradicación de cualquier tipo de hambre en el mundo, uno de sus subobjetivos incluye el garantizar el acceso a una alimentación inocua, nutritiva y suficiente durante todo el año. La simulación y optimización del pasteurizador que hemos completado como proyecto tiene por objetivo final garantizar la seguridad e inocuidad alimentaria de la leche entera, permitiendo que cualquier persona se sienta segura al ingerir el producto final que surge del sistema estudiado, por lo que se considera el cumplimiento del estudio con el ODS 2.
- b) ODS 7 “Energía asequible y no contaminante” (Naciones Unidas, 2015b): El proyecto guarda relevancia con el subobjetivo 7.3 “Duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética”. Al promover la optimización del intercambio de calor, tanto en la pasteurización como en la posterior refrigeración, se logra una clara mejora de eficiencia energética que permite lograr los objetivos del proceso haciendo un uso responsable y optimizado de los recursos energéticos.

- c) ODS 12 “Producción y consumo responsables” (Naciones Unidas, 2015c): Estando el trabajo de forma complementaria relacionado con el subobjetivo 12.2 “Lograr la gestión sostenible y el uso de los recursos naturales”, al fomentar la mejora de la eficiencia en procesos productivos sin que estos comprometan la calidad, la seguridad o el valor nutricional del producto final obtenido.

2. NOMENCLATURA

La Tabla 2 recoge los diversos parámetros y funciones que a lo largo del estudio se verán reflejados en las diversas ecuaciones y textos expuestos.

Tabla 2

Códigos de nomenclatura y definiciones.

Variable	Propiedad	Tipo	Unidad
k	Conductividad de una placa	Parámetro	W/mK
e	Espesor de una placa	Parámetro	m
LV	Distancia entre ejes conductores a distinta altura.	Parámetro	m
LH	Distancia entre ejes conductores a la misma altura	Parámetro	m
fa	Factor de alargamiento	Parámetro	Adimensional
b	Distancia entre dos placas	Parámetros	m
β	Ángulo Chevron	Parámetro	°
m	Caudal	Parámetro	kg/s
Eficacia	Rendimiento del intercambiador	Parámetro	Adimensional
Dh	Diametro hidráulico	Parámetro	m
N	Número de placas	Parámetro	Adimensional
Cp	Calor específico	Función	J/kg°C
dens (ρ)	Densidad	Función	kg/m ³
vis (μ)	Viscosidad	Función	Pa s
k	Conductividad	Función	W/mK
Re	Número de Reynolds	Función	Adimensional
Pr	Módulo de Prandtl	Función	Adimensional
Ch	Coficiente para estimar el Nusselt	Función	Adimensional
T	Temperatura	Función	°C o °K
$TL_{i,e}$	Temperatura de un fluido a la entrada	Función	°C o °K

Variable	Propiedad	Tipo	Unidad
n	Coefficiente para estimar el Nusselt	Función	Adimensional
Nu	Módulo de Nusselt	Función	Adimensional
hcv	Coefficiente de transferencia de calor por convección	Función	W/m ² K
U	Coefficiente global de transferencia de calor	Función	W/m ² K
H	Entalpía	Función	kJ
E	Eficacia	Parámetro	Adimensional
TL_iS	Temperatura de un fluido a la salida	Función	°C o °K

A continuación, la Tabla 3 recoge los diversos subíndices que se verán recogidos en los diversos apartados del trabajo:

Tabla 3

Subíndices, supra índices y subíndices dobles.

Código	Tipo	Definición
c	Subíndice	Caliente
f	Subíndice	Frío
e	Supra índice	Fluido de entrada
s	Supra índice	Fluido de salida
1	Subíndice doble	Intercambiador 1
2	Subíndice doble	Intercambiador 2
3	Subíndice doble	Intercambiador 3

3. INTRODUCCIÓN

3.1 Contexto del proceso de pasteurización

La pasteurización es un tipo de tratamiento térmico que busca la inactivación de microorganismos patógenos sin alterar las diversas propiedades que definen la calidad de la leche como ahora sus propiedades vitamínicas o nutricionales. El proceso de pasteurización garantiza la inocuidad del producto prolongando así su vida útil.

3.2 Motivación e interés del estudio

La principal motivación que se ha encontrado para la elección de este estudio como Trabajo de Final de Grado es la fuerte presencia que este tipo de procesos agroalimentarios tienen en toda la Industria y el reto que supone el entendimiento y mejora de estos. Concretamente la pasteurización mediante intercambiadores de calor por placas es un proceso llevado a cabo no solo en la búsqueda de inocuidad microbiológica de la leche, sino de otros muchos alimentos líquidos como ahora ciertos néctares, zumos o leches vegetales, concediendo al proyecto una fuerte versatilidad y posibilidad de adecuación a otras industrias que no sean solo del tipo lácteo.

La seguridad alimentaria sigue siendo un punto crítico a tratar en el futuro, las intoxicaciones alimentarias generan de hoy en día un total de 420000 muertes anuales, en este mismo periodo de tiempo las enfermedades provocadas por la ingestión de alimentos son sufridas por el 10% de la población mundial, la consecución de procesos de pasteurización eficientes que puedan dotar a los alimentos de una irreprochable seguridad y calidad alimentaria será clave en un futuro para que las intoxicaciones alimentarias no sean tan incidentes en la salud de los habitantes del mundo, todo ello pudiéndose llevar a cabo en pleno respeto con el medio ambiente y reduciendo la huella de carbono de los procesos de tratamiento (World Health Organization, 2015).

En este estudio se intentará entender de forma matemática y funcional el proceso de pasteurización, todo ello junto a la adecuación de ecuaciones matemáticas que definan el comportamiento térmico que tiene lugar en el proceso. Una vez entendido dicho modelo matemático, se tratará de mejorar el proceso global mediante una optimización. Aunque no se realizará el proceso de pasteurización de forma real, la simulación que en este estudio se llevará a cabo permitirá entender el proceso que tiene lugar en un pasteurizador y como el mismo puede mejorarse.

3.3 Marco Teórico

3.3.1 Principios de pasteurización de la leche

El proceso tecnológico de la pasteurización de la leche consiste en una elevación de la Temperatura de la leche por encima de los 72°C (Temperatura mínima a la cual tiene lugar el fenómeno de pasteurización) durante un corto tiempo (aproximadamente 10 segundos) para luego refrigerarla rápidamente a una Temperatura inferior a los 5°C (Temperatura máxima a la cual debe de quedar refrigerada la leche tras el proceso).

Dicho calentamiento es realizado con el fin de eliminar cualquier tipo de patogenicidad que pueda estar presente en el producto (véase la Tabla 4, donde se exponen los principales agentes patógenos de la leche). La posterior refrigeración del producto se realiza con el fin de evitar Temperaturas altas durante tiempos prolongados las cuales pudiesen desencadenar reacciones químicas que degradasen el producto y sus aspectos nutricionales (véase la Tabla 5, donde se describe la composición nutricional de la leche entera).

Aunque este tratamiento térmico mantiene de forma intacta las propiedades sensoriales y nutricionales al igual que minimiza la posible aparición de sabores extraños en el producto final, la pasteurización de la leche genera una desnaturalización de la cadena polipeptídica en el 25% de las proteínas del suero. (Instituto Pasteur y OMS, s.f).

Tabla 4

Principales microorganismos a inactivar en la pasteurización de la leche.

Patógeno	Características	Patogenicidad
Coxiella Burnetii	Altamente resistente al calor	Causa fiebre Q
Mycobacterium Bovis	Resistencia media al calor	Tuberculosis Bovina
Brucella Spp	Sensible al calor	Brucelosis (muy grave)

Nota. Datos tomados de Jay, J. M., Loessner, M. J., & Golden, D. A. (2005). Modern food microbiology (7th ed.). Springer.

Tabla 5

Composición de la Leche Entera (UHT) por 100 mL de producto.

Valor energético	Grasas	Hidratos de Carbono	de	Proteínas	Sal	Calcio
63 kcal	3,6 g	4,8 g		3,1 g	0,12g	120 mg

Nota. Datos tomados de El Buen Pastor.(s.f). Leche UHT entera. <https://elbuenpastorsl.com/portfolio-item/leche-uth-entera/>

En un pasteurizador se distinguen las siguientes etapas (establecidas en orden):

1. Sección de calentamiento: En esta etapa el agua caliente entra en contacto con la leche cruda intercambiándose calor de forma recíproca entre ambos fluidos a través de las placas.
2. Sección de mantenimiento: El sistema mantiene la Temperatura de pasteurización de la leche durante unos 10 segundos para asegurar la inactivación de los microorganismos patógenos.
3. Sección de recuperación: Mediante este proceso la leche ya pasteurizada cede calor a la leche cruda, estableciéndose así un intercambiador de calor mediante el cual se recupera energía térmica. Puesto que la leche ya pasteurizada irá hacia la refrigeración, puede ceder este calor a la leche que entra al pasteurizador. Entre las secciones de recuperación y calentamiento habrá una continua recirculación.
4. Sección de enfriamiento: La leche pasteurizada intercambia calor con una corriente de agua fría que hace descender a la Temperatura de la leche por debajo de los 5°C.

2.3.2 Revisión de estudios similares

2.3.2.1 Simulation and optimization of milk pasteurization processes using a general process simulator (ProSimPlus) (Bon, Clemente, Vaquiro, & Mulet, 2010).

En este artículo se muestra el esquema general de un proceso de pasteurización de leche entera el cual está funcionando mediante un intercambiador de calor por placas en el cual los fluidos discurren a contracorriente, el objetivo del estudio es desarrollar una herramienta de simulación y optimización para esta operación industrial utilizando el software "ProSimPlus".

La metodología del proyecto se inicia con la creación de una base de datos específica la cual recoge las propiedades físicas de la leche, y con la simulación del proceso completo de pasteurización el cual será emulado mediante un Intercambiador de Calor por placas estableciéndose un diagrama de flujo y completando dos casos de optimización; diseño y operación.

Dentro de los resultados principales se distingue la logra de mejoras en la eficiencia energética mediante la optimización de las variables de operación y diseño (caudales de agua, Temperaturas de entrada de los fluidos, propiedades conductoras y caloríficas de los Intercambiadores de calor,...) y la confirmación de la importancia que el Intercambiador 1 (Intercambiador de calor de recuperación) supone en esta operación industrial, representando el 83.8% del calor intercambiado en todo el proceso.

Se ha considerado que este artículo científico es relevante para el proyecto que en este documento se está llevando a cabo debido a la demostración de como los procesos de simulación y optimización pueden ser aplicados de forma efectiva al caso de la pasteurización de la leche entera.

El artículo tiene varias similitudes con el proyecto que en este documento se describe, entre ellas cabe destacar el uso de un intercambiador por placas entre las cuales los fluidos discurren a contracorriente, todo ello con la presencia de un Intercambiador de Calor de recuperación que dotará al proceso de una mayor eficiencia energética.

Las principales diferencias que existen son principalmente el uso de herramientas distintas para la simulación y optimización. Mientras que en este artículo se hace uso de ProSimPlus para simular la operación industrial, en el presente trabajo se hará uso de *COMSOL Multiphysics* y *MATLAB* tanto para simular como para optimizar.

2.3.2.2 Dynamic simulator and model predictive control of a milk pasteurizer

Un estudio particularmente relevante y comparable al trabajo aquí desarrollado es el de Thostrup et al. (2022), titulado "*Dynamic simulator and model predictive control of a milk pasteurizer*". En dicho trabajo, los autores proponen un modelo matemático detallado de un sistema de pasteurización de leche compuesto por tres zonas principales: regeneración, calentamiento y enfriamiento. El modelo se basa en balances de masa y energía aplicados dinámicamente y considera la implementación de un controlador predictivo (NMPC) para mejorar la eficiencia operativa del sistema frente a métodos tradicionales como el control proporcional-integral (PI).

Al igual que en el presente proyecto, el estudio de Thostrup et al. enfatiza la importancia de la modelización rigurosa del proceso térmico en el sistema de pasteurización, así como la simulación computacional para evaluar el comportamiento del proceso ante diferentes condiciones.

Ambos trabajos aplican ecuaciones de transferencia de calor adaptadas al diseño del intercambiador y las características térmicas de los fluidos implicados, aunque difieren en el enfoque de resolución; mientras que este proyecto realiza un análisis estacionario mediante COMSOL Multiphysics con apoyo de MATLAB para la optimización de eficiencia energética, el estudio de Thostrup et al. implementa un enfoque dinámico orientado al control predictivo.

Entre los resultados más relevantes del estudio citado, se destaca que el control predictivo permite una regulación más estable y precisa de la temperatura del fluido pasteurizado frente a perturbaciones externas, mejorando la seguridad y la calidad del proceso. Por otro lado, el presente proyecto se centra más en el análisis térmico detallado y la mejora de la eficiencia energética a través de la optimización del calor intercambiado.

En resumen, ambos estudios comparten una base metodológica común en cuanto a la modelización matemática y simulación del proceso de pasteurización, pero se diferencian en sus objetivos finales: control avanzado del sistema en el caso del trabajo de Thostrup et al., y optimización energética en el caso del presente estudio.


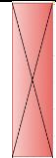
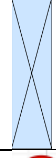




4.OBJETIVOS DEL TRABAJO

El objetivo general de este Trabajo de Final de Grado es aplicar una herramienta que permita simular y optimizar el proceso térmico de pasteurización de la leche entera. Para ello se establecen los siguientes objetivos particulares:

- Adaptar el modelo matemático que permita simular el proceso de transferencia de calor entre fluidos a través de placas.
- Estudio del método y herramienta de cálculo que permita resolver el modelo matemático planteado.
- Formulación de un problema de optimización del proceso de pasteurización de leche a partir del objetivo establecido: Eficiencia energética.
- Estudio del método y herramienta de resolución del problema de optimización formulado.

Tabla 6

Definición gráfica de los elementos presentes en el diagrama de simulación.

Unidad de cálculo	Definición
	Intercambiador de recuperación de calor (Intercambiador de calor 1)
	Intercambiador de calentamiento (Intercambiador de calor 2)
	Intercambiador de enfriamiento (Intercambiador de calor 3)
	Sección de calentamiento de agua
	Sección de enfriamiento de agua
	Tubería de conducción de agua a las secciones de enfriamiento/calentamiento
	Sección de mantenimiento de calor

5.1.2 Descripción y justificación del intercambiador de calor

Como muestra el diagrama de simulación, en el proceso hay tres unidades de cálculo que corresponden a intercambiadores de calor. Un sistema basado en una circulación de fluidos a contracorriente ha prevalecido sobre un sistema basado en una circulación de fluidos en paralelo debido a que en contracorriente es mayor la fuerza impulsora para la transferencia de calor (incremento de Temperatura medio logarítmico, ΔT_{lm}), por lo que se incrementa calor entre ambos fluidos a mayor velocidad.

Se ha elegido principalmente un intercambiador por placas antes que un sistema basado en tubos debido a que el Coeficiente Global de Transferencia de Calor (U) es mayor en placas que en tubos, esto confiere al sistema seleccionado una mayor eficiencia térmica por unidad de área.

5.1.3 Desarrollo del modelo

5.1.3.1 Ecuaciones de Gobierno

5.1.3.1.1 Ecuaciones de Gobierno para la placa

Las ecuaciones expuestas en este apartado fueron extraídas de Incropera y DeWitt (2007) y también según lo expuesto por Hahn y Özisik (2012), según dichas referencias bibliográficas la base del modelo matemático se construye a partir del principio de conservación de la energía. La figura 2 representa esquemáticamente el elemento diferencial que existe dentro de una placa, de forma análoga, la figura 3 describe el balance energético aplicado en dicho elemento diferencial paralelepípedo en la placa. Ese elemento diferencial representa una parte de la placa, lo más grande posible, en la cual la Temperatura es prácticamente la misma; por lo tanto, despreciando el calor que se intercambia en una placa con el entorno que la rodea (aire) con respecto del que se intercambia con los fluidos que están en contacto con ella, el elemento diferencial sería un paralelepípedo de longitud igual a la anchura de la placa y de dimensión diferencial en las otras direcciones (x, y).

Ya que se considera que la placa se encuentra en régimen estacionario la acumulación sería 0 ($A=0$), como no habrá generación de energía calorífica en la placa la generación será nula ($G=0$).

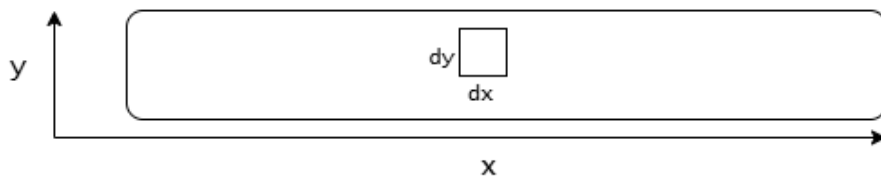


Figura 2: Elemento diferencial en una placa (placa i).

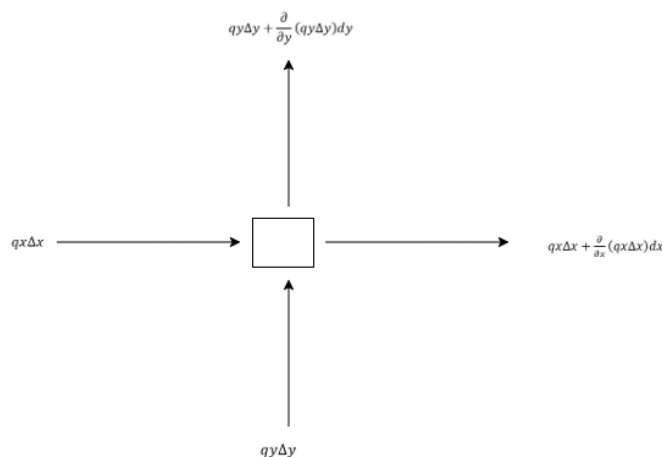


Figura 3: Balance energético en el elemento diferencial de la placa.

Este análisis considera las transferencias de calor por conducción que tiene lugar en ambas direcciones del plano de la placa (ejes X e Y), de acuerdo con la ley de Fourier.

En este contexto, las áreas por las que se transfiere calor en cada dirección se calculan en función de la geometría de la placa y del tamaño del elemento diferencial considerado.

- Para el flujo de calor en la dirección horizontal (eje X), el área correspondiente se obtiene multiplicando la anchura de la placa por el diferencial en el eje Y según muestra la ecuación 1.

$$\Delta x = LH \, dy \quad (1)$$

- Para el flujo en la dirección vertical (eje Y), el área se calcula multiplicando la anchura de la placa por el diferencial en el eje X tal y como se expresa en la ecuación 2

$$\Delta y = LH \, dx \quad (2)$$

Estas áreas representan las superficies laterales del elemento diferencial a través de las cuales entra o sale calor por conducción.

La ley de Fourier establece que esta transferencia de calor ocurre desde las zonas de mayor temperatura hacia las de menor temperatura, siendo proporcional al gradiente de temperatura y con la conductividad térmica del material como constante de proporcionalidad. Las ecuaciones 3 y 4 describen la transferencia de calor en ambos ejes (X e Y) respectivamente.

$$q_x = -k \frac{\partial T_i}{\partial x} \quad (3)$$

$$q_y = -k \frac{\partial T_i}{\partial y} \quad (4)$$

Este enfoque diferencial permite obtener, a partir del balance de energía, la base para las ecuaciones de gobierno que rigen el comportamiento térmico de las placas en el intercambiador de calor.

Aplicando la ecuación general de los balances de propiedad (Entrada + Generación = Salida + Acumulación), considerando el sistema (elemento diferencial), los flujos de propiedad mostrados en la figura 3 y teniendo en cuenta que el sistema se encuentra en régimen estacionario (Acumulación = 0 y Generación = 0) se puede describir la expresión matemática que describe la transferencia de calor en sólidos tal y como describe la ecuación 5, siendo esta la ecuación de gobierno de las placas.

$$\vec{\nabla}(-k\vec{\nabla}T_i) = \frac{\partial}{\partial x}\left(-k\frac{\partial T_i}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(-k\frac{\partial T_i}{\partial y}\right) = 0 \quad (5)$$

5.1.3.1.2 Ecuaciones de gobierno del Fluido

Las ecuaciones expuestas en el siguiente apartado fueron establecidas según lo dispuesto por Kaviany (s.f) y Ghiaasiaan (s.f).

La circulación de los fluidos por el interior del intercambiador de placas se produce de forma alterna, tal y como se ilustra en la figura 4.

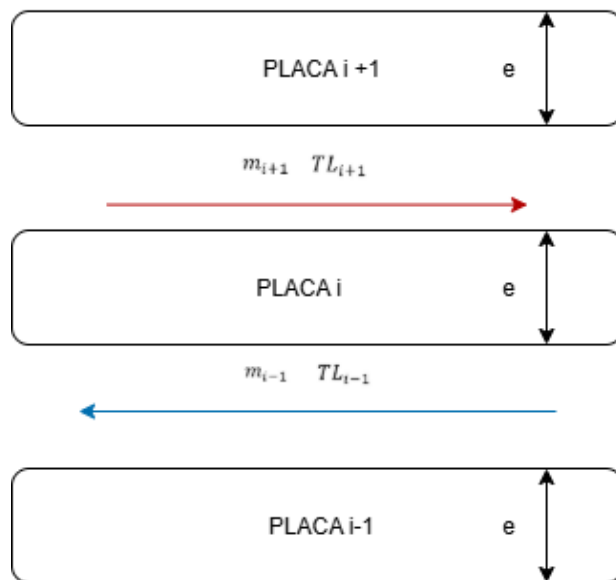


Figura 4: Representación de la circulación a contracorriente.

Considerando que el fluido se encuentra prácticamente en régimen turbulento se desprecia el gradiente de Temperatura en la dirección y (en cada fluido). Al igual que en las placas, en los líquidos también existe un elemento diferencial, este viene representado por un volumen control el cual supone una parte espacial atravesada por el fluido en la cual la Temperatura prácticamente es constante. Despreciando el calor que el fluido intercambia con el entorno que lo rodea diferente a las placas con respecto del calor que intercambia el fluido con las placas con las que está en contacto, el volumen control sería una parte espacial paralelepípedica de longitud igual a la anchura de la placa, de altura igual a la distancia que hay entre dos placas y de dimensión diferencial en la dirección x, pues en esta dirección si hay cambio de Temperatura en el fluido. Las figuras 5 y 6 representan una esquematización matemática de la circulación de fluidos a contracorriente.

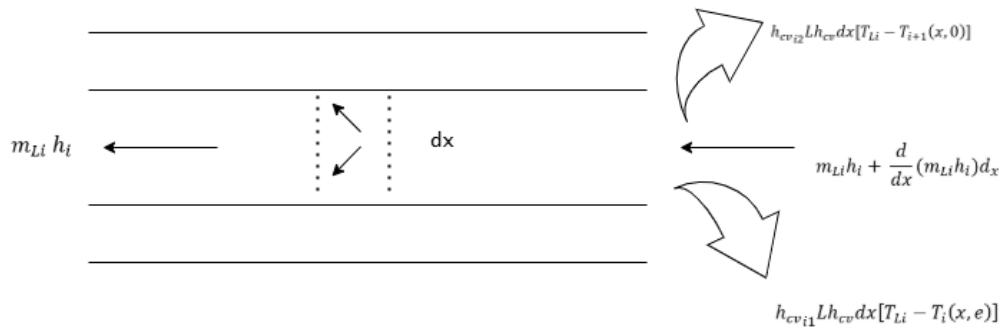


Figura 5: Representación del volumen de control diferencial en la dirección negativa de X.

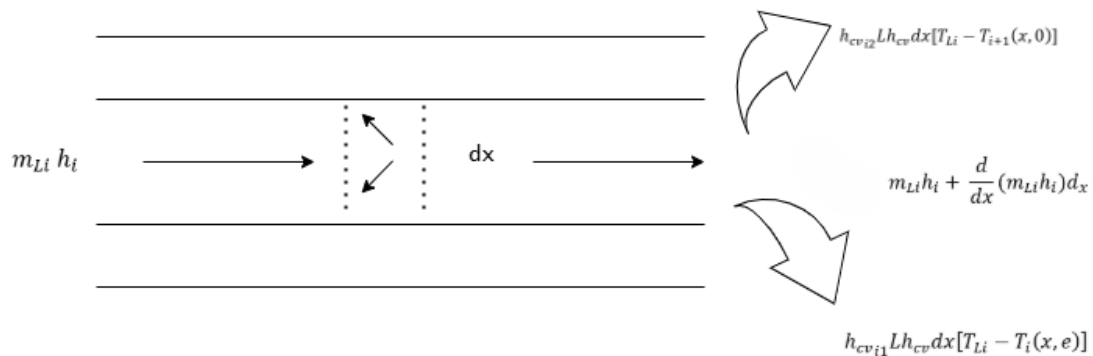


Figura 6: Representación del volumen de control diferencial en la dirección positiva de X.

En las ecuaciones 6 y 7 los dos términos sumados representan las transferencias de calor por convección desde el fluido hacia cada una de las dos caras de la placa que lo separa del fluido adyacente, reflejando así la pérdida de energía del fluido debido a su interacción térmica con ambas superficies de la placa. Aplicando la ecuación general de los balances de propiedad (Entrada + Generación = Salida + Acumulación), considerando el sistema (volumen de control diferencial), los flujos de propiedad mostrados en la figura 7 teniendo en cuenta que el sistema se encuentra en régimen estacionario (Acumulación = 0) y que no hay en él generación de energía calorífica (Generación = 0), se obtienen las ecuaciones de gobierno mostradas a continuación (ecuaciones 6 y 7):

$$\frac{m_{Li} C_{pLi}}{L h_{cv}} \frac{dT_{Li}}{dx} = h_{cv i1} L h_{cv} [T_{Li} - T_i(x, e)] + h_{cv i2} L h_{cv} [T_{Li} - T_{i+1}(x, 0)] \quad (6)$$

$$-\frac{m_{Li} C_{pLi}}{L h_{cv}} \frac{dT_{Li}}{dx} = h_{cv i1} L h_{cv} [T_{Li} - T_i(x, e)] + h_{cv i2} L h_{cv} [T_{Li} - T_{i+1}(x, 0)] \quad (7)$$

La ecuación 6 hace referencia a la ecuación de gobierno para fluidos que circulan en la dirección negativa de x y la ecuación 7 se corresponde con fluidos que circulan en la dirección positiva de x.

Esta expresión toma en cuenta el calor intercambiado por convección entre el fluido y las pertinentes superficies de cada placa. Para la ecuación 6, m_i es el caudal másico del fluido, Cp_{Li} su calor específico, T_{Li} la temperatura del fluido (que se considera a una distancia X del origen de coordenadas, prácticamente uniforme debido a la turbulencia del fluido), $h_{cv_{i1}}$ y $h_{cv_{i2}}$ los coeficientes de transferencia de calor por convección en la cara superior e inferior respectivamente y L_H representa la anchura de la placa. La ecuación 6 viene definida por un balance donde la tasa de variación del flujo de calor por unidad de superficie y unidad de longitud (primer término) es igual al sumatorio del término de convección del fluido en contacto con la cara superior de una placa i (segundo término) más el término de convección del mismo fluido con la cara inferior de una placa i+1.

La expresión matemática de la ecuación 7 representa un flujo acumulado o pérdida de energía interna del fluido, y se deriva de una derivada convectiva del calor sensible.

Finalmente, el número total de ecuaciones de gobierno será equivalente a cuantas placas y fluidos haya en el sistema, dado que existen N placas y N-1 fluidos el total de ecuaciones de gobierno será de 2N-1, como el sistema electo está dotado de 35 placas el total de ecuaciones de gobierno equivaldrá a 69.

5.1.3.2 Condiciones de contorno:

Dentro de las ecuaciones de contorno existentes se distinguirán dos tipos:

- N-1 ecuaciones para los fluidos: Puesto que son ecuaciones de primer orden respecto del espacio se necesitará una condición de contorno por cada ecuación de gobierno.
- 4N ecuaciones para las placas: Dado que son ecuaciones de segundo orden respecto de cada uno de los ejes (x,y) se precisarán dos condiciones por cada una de las direcciones espaciales (x,y).

Las condiciones de contorno para el eje X se explican según las ecuaciones 8 y 9.

$$\frac{\partial T_i}{\partial x}(0, y) = 0 \rightarrow i \in [1, N] \quad (8)$$

$$\frac{\partial T_i}{\partial x}(LV, y) = 0 \rightarrow i \in [1, N] \quad (9)$$

Las derivadas parciales mencionadas explican que tanto en los extremos izquierdos y derechos de $N=35$ placas no existe conductividad térmica, la presencia de aislante térmico en dichas paredes inhibirá posibles pérdidas en las direcciones vectoriales indeseadas.

Mediante las ecuaciones 10 y 11 se explican las condiciones de contorno para el eje Y:

$$-k \frac{\partial T_i}{\partial y}(x, 0) = \begin{cases} h_{i-1}(T_{Li-1} - T_i) \rightarrow i \in [2, N] \\ 0 \rightarrow i \in [1] \end{cases} \quad (10)$$

$$-k \frac{\partial T_i}{\partial y}(x, e) = \begin{cases} 0 \rightarrow i \in [35] \\ h_i(T_i - T_{Li}) \rightarrow i \in [1, N - 1] \end{cases} \quad (11)$$

Según expresan las ecuaciones 10 y 11 para el eje Y, el flujo de calor en la dirección vectorial de este eje está gobernada por la ley de Fourier y la convección excepto en la cara superior de la última placa y la cara inferior de la primera placa del intercambiador de calor.

En las condiciones de contorno para el fluido, cuando el fluido circula en el sentido negativo del eje X se adopta la ecuación 12, cuando este circula en sentido positivo se adopta la ecuación 13.

$$T_{Li}(LV) = T_{Lie} \quad (12)$$

$$T_{Li}(0) = T_{Lie} \quad (13)$$

5.1.3.3 Relaciones subsidiarias

5.1.3.3.1 Coeficiente individual de transferencia de calor por convección

El coeficiente individual de transferencia de calor por convección fue estimado según Saunders (1988) y Kumar (1984), de acuerdo con dichas referencias bibliográficas el coeficiente deberá calcularse a partir del número de Nusselt.

Una vez calculado este, se podrá despejar el coeficiente (h_{cv}). El número de Nusselt deberá de calcularse entonces inicialmente según la ecuación 14 para poder despejar luego el coeficiente individual de transferencia de calor por convección a partir de la ecuación 15.

$$Nu = C_h Re^n Pr^{1/3} \quad (14)$$

$$Nu = \frac{h_{cv} Dh}{k} \quad (15)$$

Aunque los valores C_h y n son valores empíricos dependientes del régimen del fluido en el cual nos encontremos (dependientes del Reynolds) si que se deberán de estimar previamente el Diámetro Hidráulico, el número de Reynolds y el módulo de Prandtl a partir de las ecuaciones 16,17 y 18 respectivamente.

$$Dh = \frac{2b}{fa} \quad (16)$$

$$Re = \frac{2m}{(N-1)b L_w} \times \frac{Dh}{\mu} \quad (17)$$

$$Pr = \frac{Cp \times \mu}{k} \quad (18)$$

Aunque se puede obtener un valor fijo del coeficiente individual de transferencia de calor por convección, este será dependiente de la Temperatura puesto que muchos de los parámetros necesarios para su cálculo (viscosidad, conductividad, ...) lo son también. De esta forma durante la simulación h_{cv} tendrá un valor variable de acuerdo con la Temperatura, dicho valor variable será siempre calculado por la herramienta informática empleada para la simulación (COMSOL).

5.1.3.3.2 Propiedades físico-térmicas de los fluidos

Las ecuaciones que describen las propiedades físicas de ambos fluidos existentes (agua y leche) han sido obtenidas a partir de la literatura técnica (The Engineering ToolBox, 2003).

Para el cálculo de las propiedades físico-térmicas del agua se introducen las ecuaciones 19, 20,21 y 22.

$$Cp = 4211 - 2.355 \times T + 0.05604 \times T^2 - 0.000526 \times T^3 + 0.000002063 \times T^4 \quad (19)$$

$$\rho = 1000 + 0.0111 \times T - 0.00577 \times T^2 + 0.0000151 \times T^3 \quad (20)$$

$$\mu = (0.001712 - 0.0000443 \times T + 0.0000005322 \times T^2 - 0.00000002357 \times T^3) \quad (21)$$

$$k = 0.5467 + 0.00207 \times T - 0.0000115 \times T^2 + 0.00000002222 \times T^3 \quad (22)$$

Con el fin de estimar las propiedades físico-térmicas de la leche se introducen a partir de la misma referencia bibliográfica citada anteriormente (The Engineering ToolBox, 2003) las ecuaciones 23,24,25 y 26.

$$Cp = 3744.48 + 1.15 \times T + 0.00393 \times T^2 \quad (23)$$

$$\rho = 1042.01 - 0.37 \times T + 0.00036 \times T^2 \quad (24)$$

$$\mu = (2.82 - 0.0458 \times T + 0.000283 \times T^2) \times 10^{-3} \quad (25)$$

$$k = 0.49 + 0.00223 \times T - 0.0000108 \times T^2 \quad (26)$$

5.2 Simulación del proceso de pasteurización

Para poder simular de forma realista el proceso de pasteurización es necesario resolver el modelo matemático desarrollado, que es un conjunto de ecuaciones diferenciales, ecuaciones en derivadas parciales y ecuaciones algebraicas. Para ello, dada la complejidad del modelo, es apropiado aplicar un método numérico con el fin de resolver las ecuaciones diferenciales y en derivadas parciales, como podría ser el método de elementos finitos. Una herramienta disponible y útil para aplicar ese método es COMSOL Multiphysics. Esta herramienta, aplicando el método de elementos finitos, transforma el sistema de ecuaciones diferenciales en un conjunto de ecuaciones algebraicas. Esta conversión se realiza discretizando cada dominio del intercambiador (ya sean placas o canales de fluido) en una malla compuesta por un elevado número de elementos finitos.

Cada uno de estos elementos finitos representa un pequeño volumen en el que resuelve localmente el modelo matemático, garantizando una descripción detallada del comportamiento térmico del sistema.

Cuanto mayor sea el número de elementos, mayor será el número de ecuaciones algebraicas que genera el modelo, lo que se traduce en un incremento del grado de precisión de la simulación, pero incrementa el tiempo de cálculo.

En este sentido, la modelización implementada en COMSOL permite analizar con elevada fidelidad la distribución de temperaturas en las placas y en los fluidos, así como evaluar el efecto de distintos parámetros operativos sobre la eficiencia térmica del proceso de pasteurización (COMSOL, 2016).

La elección de COMSOL Multiphysics frente a otras alternativas, como ANSYS Fluent o SymScale, se justifica por la flexibilidad y facilidad que ofrece para configurar modelos físicos personalizados y acoplar múltiples dominios en una misma simulación.

A diferencia de otros programas orientados principalmente al análisis de dinámica de fluidos, COMSOL permite integrar de forma directa los fenómenos de conducción y convección con geometrías complejas y condiciones de contorno específicas, todo ello en un entorno intuitivo y adaptado a las necesidades del presente estudio.

Adicionalmente, para simular de forma correcta el comportamiento global del sistema compuesto por varios intercambiadores en serie, se ha empleado MATLAB como herramienta de coordinación fijando una secuencia lógica de resolución del modelo desarrollado entre los diferentes intercambiadores de calor presentes en el proceso de pasteurización. De forma pertinente y siguiendo el diagrama de flujo de la simulación, con MATLAB se han podido establecer los valores de salida de un intercambiador inicial como valores de entrada de un intercambiador final.

5.3 Optimización del proceso de pasteurización

La optimización planteada en este proyecto tiene como objetivo principal maximizar la eficiencia energética del proceso de pasteurización y posterior enfriamiento de la leche. Esta eficiencia energética se define como la relación entre la energía térmica intercambiada y la masa de fluido utilizada para lograr dicho intercambio, considerando tanto el fluido caliente utilizado para elevar la temperatura de la leche como el fluido frío encargado de enfriarla hasta su temperatura de almacenamiento.

En términos matemáticos, el problema de optimización se formula como la búsqueda de los valores óptimos de un conjunto de variables decisorias, es decir, aquellas variables del proceso que pueden ser controladas y ajustadas, y cuyos valores influyen directamente en la eficiencia del sistema.

Entre estas variables se encuentran los caudales másicos de los fluidos de entrada y sus respectivas Temperaturas.

La función objetivo del problema, por tanto, representa la eficiencia energética total del sistema, y se maximiza al calcular las condiciones que permiten intercambiar la mayor cantidad de energía térmica útil utilizando caudales másicos de entrada mínimos.

El proceso de optimización está sujeto a una serie de restricciones físicas y operativas que aseguran la viabilidad técnica del sistema y el cumplimiento de los criterios de calidad del proceso, tales como alcanzar la temperatura mínima de pasteurización o no superar la Temperatura máxima a la cual la leche debe de quedar refrigerada tras la finalización del proceso.

5.3.1 Función Objetivo

En la ecuación 27 se describe la función objetivo que desde MATLAB se deberá de optimizar para maximizar la eficiencia. Dicha ecuación representa el calor total intercambiado en los intercambiadores de calor 2 y 3.

$$FO = O_2 + O_3 \quad (27)$$

$$O_2 = \int_{T_{cs2}}^{T_{ce2}} C_{pc} dT \quad (28)$$

$$O_3 = \int_{T_{fe3}}^{T_{fs3}} C_{pf} dT \quad (29)$$

Las ecuaciones 28 y 29 representan el cálculo de la energía específica intercambiada en los intercambiadores 2 y 3 respectivamente, desde un punto de vista termodinámico y energético. El resultado de las integrales es la energía por unidad de masa (J/kg) intercambiada por el fluido en cuestión al pasar de una Temperatura inicial a una Temperatura final. Para obtener el resultado se integra la función descrita por el calor específico entre el límite superior (Temperatura mayor la cual será de entrada o de salida según el intercambiador) e inferior (Temperatura menor la cual será de entrada o de salida según el intercambiador) de cada integral. El calor específico vendrá a estar representado por la ecuación 19 en las ecuaciones 28 y 29. Las ecuaciones 28 y 29 se relacionan directamente con la eficiencia del proceso puesto que permiten cuantificar con precisión cuanto calor útil ha sido transferido para alcanzar los objetivos de pasteurización y refrigeración teniendo en cuenta la variación del calor específico con la Temperatura. Al maximizar la ecuación 27 (Función Objetivo) se encontrarán las condiciones óptimas para las cuales se intercambia una mayor cantidad de calor por unidad de masa (J/kg), por tanto, la maximización de dicha función supondrá la eficacia máxima a la cual el sistema puede llegar.

5.3.2 Variables Decisorias

La eficacia máxima del sistema deberá de conseguirse modificando las siguientes variables decisorias:

- Caudal del fluido caliente en el intercambiador 2 (agua).
- Temperatura del fluido caliente a la entrada del intercambiador 2.
- Caudal del fluido frío en el intercambiador 3 (agua).
- Temperatura de entrada del fluido frío en el intercambiador 3.

$$mc2 \quad Tce2 \quad mf3 \quad Tfe3$$

5.3.3 Restricciones

Asimismo, las variables decisorias deberán de cumplir en la optimización con la siguiente serie de restricciones:

$$Tfs2 \geq 72 \text{ } ^\circ\text{C} ;$$

$$Tfe3 > 0 \text{ } ^\circ\text{C} ;$$

$$Tcs3 \leq 5 ;$$

$$m > 0 ;$$

Estas restricciones se imponen con el fin de que no se modifiquen los siguientes objetivos:

- a) Que la Temperatura de pasteurización se cumpla para conseguir la inocuidad microbiológica en todo momento ($Tfs2 \geq 72 \text{ } ^\circ\text{C}$).
- b) Que no se produzca ningún cambio de fase o formación de hielo que pueda afectar a la estabilidad del proceso ($Tfe3 > 0 \text{ } ^\circ\text{C}$).
- c) Que la leche refrigerada tenga una Temperatura acorde a la estabilización que requieren sus propiedades para no perder calidad tras el proceso de pasteurización ($Tcs3 \leq 5$).
- d) Que los caudales tengan valores razonables y sentido físico en todo momento ($m > 0$).

5.3.4 Herramientas de cálculo

Para abordar el problema de optimización planteado, se utilizó el software MATLAB que dispone de herramientas específicas para la resolución de problemas de optimización no lineales con restricciones, como es el caso del formulado en este trabajo.

La naturaleza del problema requiere la evaluación repetida de la función objetivo, la cual depende de la simulación del proceso de pasteurización bajo distintas condiciones operativas.

Dado que cada evaluación de la función objetivo implica una nueva simulación del modelo físico, fue necesario establecer una interconexión entre MATLAB y COMSOL Multiphysics, aprovechando las funcionalidades integradas entre ambos entornos. Esta conexión permite automatizar la ejecución de simulaciones en COMSOL desde MATLAB, facilitando así el análisis iterativo necesario para alcanzar una solución óptima.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente apartado del proyecto se introducirán los bloques de código de MATLAB, estructuras con código ejecutable que servirán para simular el proceso, optimizarlo y obtener resultados.

6.1 Resultados de la simulación térmica

6.1.1 Estructuración de la simulación en COMSOL Multiphysics

Para simular el intercambiador de calor se han construido un total de 35 placas, correspondiendo un dominio a cada una. Véase en la figura 7 la estructura geométrica del intercambiador de calor.

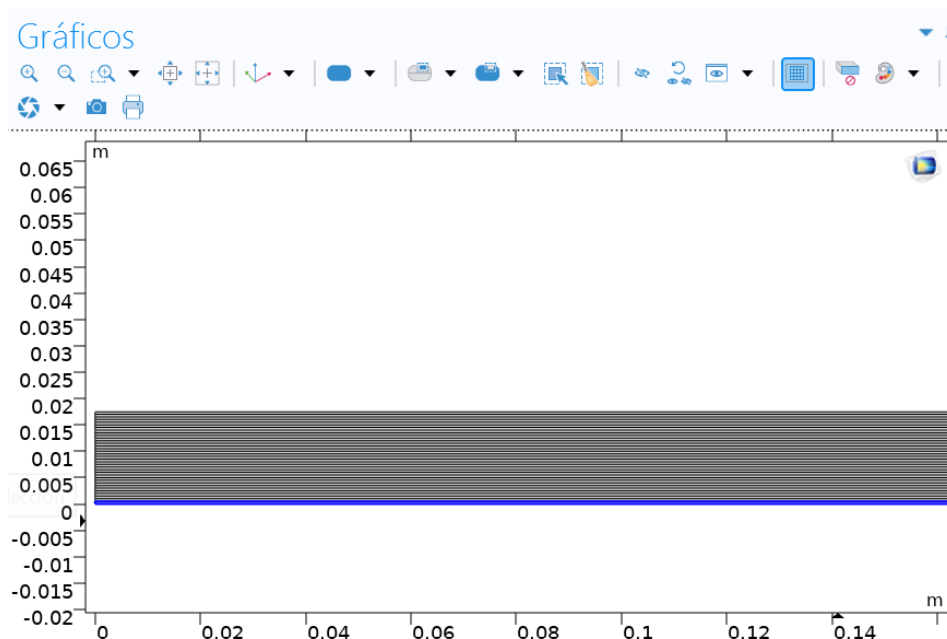


Figura 7: Geometría del sistema para la simulación.

Para la correcta simulación de la pasteurización se ha asignado a cada placa un espesor de 0,5 milímetros y una longitud de 41,8 centímetros. En la figura 8 se aprecian a escala dichas medidas (suponiendo la longitud y el espesor de una placa del intercambiador, cuyas medidas son iguales al resto de placas).

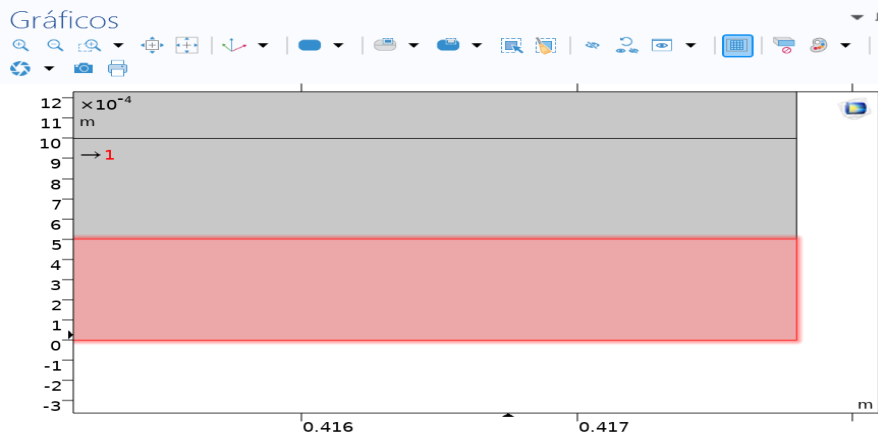


Figura 8: Espesor y longitud de una placa.

En cada uno de los tres intercambiadores de calor hay un total de 34 canales entre los cuales fluyen 17 fluidos fríos y 17 fluidos calientes, a cada canal se le ha asignado un contorno (véase la figura 9, donde se representa la asignación de un contorno al primer canal del intercambiador) el cual se encuentra entre dos dominios, procediendo a interactuar cada fluido con dos placas.

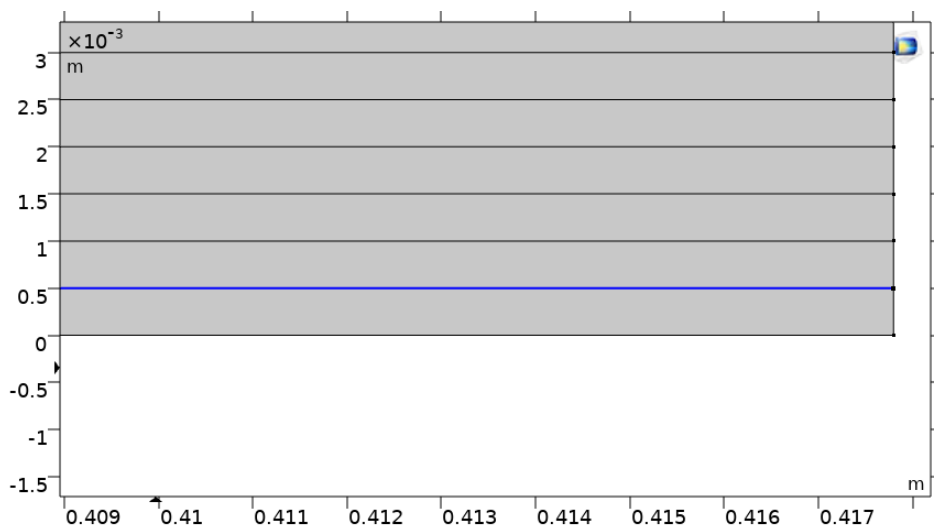


Figura 9: Contorno asignado al primer canal del intercambiador.

Dentro de cada intercambiador de calor también habrá zonas que se consideran aisladas térmicamente, lo cual ya está previamente establecido dentro de las ecuaciones expuestas en las condiciones de contorno de las placas; estas zonas de aislamiento serán todas las paredes laterales de las placas, la cara inferior de la placa 1 (puesto que no hay contacto con ningún fluido en esa zona) y la cara superior de la placa 35 (debido a la misma razón que en el caso de la placa 1).

Eso no significa que dichas caras estén perfectamente aisladas, pero se consideran como simplificaciones basándose en que los calores que se intercambian en esas superficies son despreciables con respecto al calor intercambiado en el resto de las superficies de las placas.

Para llevar a cabo la simulación del pasteurizador se ha empleado una discretización basada en el método de los elementos finitos, implementado en COMSOL Multiphysics una malla. La malla utilizada es especialmente adecuada para geometrías regulares como las que presentan las placas del intercambiador de calor, ya que permite un control preciso del refinamiento en las distintas direcciones del dominio. En la figura 10 se puede observar la disposición de la malla usada para las placas en el intercambiador.



Figura 10: Malla empleada para una placa.

Desde el punto de vista físico, para la figura 10, cada uno de los elementos generados representa una celda sobre la que se resuelve el balance de energía diferencial. Por tanto, el número de elementos de la malla tiene una relación directa con el número de ecuaciones algebraicas que se generan en el sistema. A más elementos, mayor es la resolución espacial del modelo y, en consecuencia, la precisión con la que se describe la distribución térmica del sistema, pero incrementa sustancialmente el tiempo de cálculo. Previamente ya se analizó el número de elementos de forma que incrementándose el número de estos no se veía una mejora significativa en la precisión de cálculo.

6.1.2 Proceso de pasteurización

El proceso térmico realizado en el software COMSOL Multiphysics fue simulado con valores de entrada supuestos los cuales se consideraron que podían arrojar como resultados valores lógicos, para establecer dichos valores, se tuvieron en cuenta las limitaciones y características físico-estructurales del intercambiador de calor (observables en la Tabla 7). Por ello se debieron de adaptar los caudales a secciones y anchos de canal no excesivamente altos (véase el ancho de canal en la Tabla 7). La simulación se ha centrado principalmente en verificar el sentido físico de la operación de pasteurización y la posterior concordancia de los resultados. En el presente apartado del proyecto se comentarán los resultados de la recreación informática del proceso.

Los valores supuestos fueron los siguientes:

$$mc2 = 0,5 \frac{kg}{s};$$

$$mLe = 0,08 \frac{kg}{s};$$

$$mf3 = 0,7 \frac{kg}{s};$$

$$Tce2 = 85^{\circ}C;$$

$$TLe = 15^{\circ}C;$$

$$Tfe3 = 1^{\circ}C;$$

Asimismo, en la simulación del proceso de pasteurización se tomaron los siguientes valores como parámetros fijos en todos los intercambiadores para poder simular de forma exitosa:

Tabla 7

Parámetros físico-estructurales del intercambiador de calor.

Parámetro	Valor
Conductividad de la placa (k)	16,3 W/mK
Espesor (e)	0,0005 m
Distancia entre ejes conductores a distinta altura (LV)	0,357 m
Distancia entre ejes conductores a la misma altura (LH)	0,06 m
Factor de alargamiento (fa)	1,1703
Distancia entre placas/ancho de canal (b)	0,0027381 m
Ángulo Chevron	45°
Número de Placas (N)	35

Como se ha dicho previamente COMSOL convierte el modelo de ecuaciones diferenciales en un conjunto de ecuaciones algebraicas el cual dependerá del número de ecuaciones de gobierno y del número de elementos. Las ecuaciones algebraicas contribuyen en este caso a un sistema de ecuaciones no lineales cuya resolución requiere de la aplicación de algún método, en este caso se selecciona el método Pardiso (disponible en COMSOL) para ello.

Para coordinar el comportamiento conjunto del sistema completo, se desarrolló un bloque de código en MATLAB (Bloque de código 1), este script es esencial para entender la dinámica térmica del sistema, ya que permite estructurar los valores de entrada y salida de cada dominio de forma coherente, reflejando el comportamiento físico real del pasteurizador.

Además, es a través de este bloque de código que se extraen los resultados finales de la simulación, al consolidar todos los datos relevantes para cada uno de los intercambiadores de calor de forma sincronizada.

Análogamente, el bloque de código 1, calcula la Temperatura final de una variable de salida como la media de la Temperatura de los 17 fluidos que salen de un proceso de intercambio energético concreto.

```

1 function res = ejecucionproceso(mC, mL, mF, Tce, TLe, Tfe, Tfe2)
2     global Tfs2 Tcs3 Tfs1
3     com.comsol.model.util.ModelUtil.showProgress(true);
4
5     try model = mphload('C:\Trabajos\Docencia\Ignacio\Nueva carpeta\INTERCAMBIADOR 2.mph'); catch ME, error('Error al cargar modelo COMSOL: %s', ME.message); end
6     fa = str2double(model.param.get('fa')); LV = str2double(model.param.get('LV')); e = str2double(model.param.get('e'));
7     model.param.set('Tce', num2str(Tce)); model.param.set('Tfe', num2str(Tfe2)); model.param.set('mF', num2str(mL)); model.param.set('mC', num2str(mC)); model.study('std1').run;
8     for i = 1:17
9         TF = ['TL', num2str(2 * i - 1)]; Tfs(i) = mphinterp(model, TF, 'coord', [0.0001; e * (2 * i - 1)], 'edim', 1) - 273.16;
10        TC = ['TL', num2str(2 * i)]; Tcs(i) = mphinterp(model, TC, 'coord', [fa * LV * 0.99; 2 * i * e], 'edim', 1) - 273.16;
11    end
12    Tfs2 = mean(Tfs(:)); Tcs2 = mean(Tcs(:));
13
14    try model = mphload('C:\Trabajos\Docencia\Ignacio\Nueva carpeta\INTERCAMBIADOR 1.mph'); catch ME, error('Error al cargar modelo COMSOL: %s', ME.message); end
15    model.param.set('Tce', num2str(Tfs2)); model.param.set('Tfe', num2str(TLe)); model.param.set('mF', num2str(mL)); model.param.set('mC', num2str(mL)); model.study('std1').run;
16    for i = 1:17
17        TF = ['TL', num2str(2 * i - 1)]; Tfs(i) = mphinterp(model, TF, 'coord', [0.0001; e * (2 * i - 1)], 'edim', 1) - 273.16;
18        TC = ['TL', num2str(2 * i)]; Tcs(i) = mphinterp(model, TC, 'coord', [fa * LV * 0.99; 2 * i * e], 'edim', 1) - 273.16;
19    end
20    Tfs1 = mean(Tfs(:)); Tcs1 = mean(Tcs(:));
21
22    try model = mphload('C:\Trabajos\Docencia\Ignacio\Nueva carpeta\INTERCAMBIADOR 3.mph'); catch ME, error('Error al cargar modelo COMSOL: %s', ME.message); end
23    model.param.set('Tce', num2str(Tcs1)); model.param.set('Tfe', num2str(Tfe)); model.param.set('mF', num2str(mF)); model.param.set('mC', num2str(mL)); model.study('std1').run;
24    for i = 1:17
25        TF = ['TL', num2str(2 * i - 1)]; Tfs(i) = mphinterp(model, TF, 'coord', [0.0001; e * (2 * i - 1)], 'edim', 1) - 273.16;
26        TC = ['TL', num2str(2 * i)]; Tcs(i) = mphinterp(model, TC, 'coord', [fa * LV * 0.99; 2 * i * e], 'edim', 1) - 273.16;
27    end
28    Tfs3 = mean(Tfs(:)); Tcs3 = mean(Tcs(:));
29
30    res = [Tcs1, Tfs1, Tcs2, Tfs2, Tcs3, Tfs3];
31 end

```

Bloque de código 1: Ejecución y simulación del proceso.

Las figuras que se muestran en los siguientes apartados son extraídas a partir de la evolución de la Temperatura en un canal dado, para ello se ha elegido el canal 22 (correspondiente a los fluidos calientes en los intercambiadores) y el canal 21 (asociado a fluidos fríos de cada intercambiador), el hecho de elegir dichos canales corresponde a que estos están en posiciones centrales del intercambiador, lo que asegura que las evoluciones sobre el gráfico estarán cerca de la media de las Temperaturas y serán representativas del conjunto.

6.1.2.1 Resultados del Intercambiador de Calor 2

Tras simular el proceso en el primer intercambiador de calor, al cual ingresan los fluidos, se han obtenido los siguientes resultados:

- Temperatura de salida del fluido caliente (Tcs2) = 76 °C
- Temperatura de salida del fluido frío (Tfs2) = 83,35 °C

Con estos valores de entrada, en la simulación de la pasteurización en el intercambiador de calor 2, la leche a la salida del pasteurizador (T_{fs2}) alcanza una temperatura de $83,35^{\circ}\text{C}$. De esta manera se logra la temperatura necesaria para la pasteurización, habiéndose transferido energía en el intercambiador por un valor de $37,77 \text{ kJ/s}$ (calculado a partir de la ecuación 28).

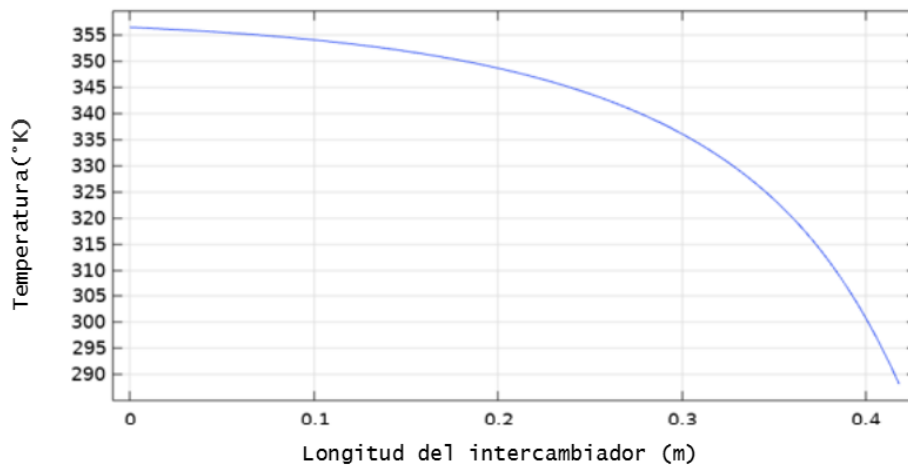


Figura 11: Evolución de la Temperatura de la leche en el intercambiador 2.

En la figura 11 se representa la curva correspondiente a la evolución de la temperatura del fluido frío (leche). Dicho gráfico establece la relación entre la temperatura, expresada en grados Kelvin (eje Y), y la distancia a lo largo de la placa intercambiadora (eje X). Es importante destacar que la condición de Dirichlet para los fluidos fríos se encuentra situada en el extremo derecho de todos los intercambiadores; en consecuencia, en el presente caso la evolución de la temperatura debe interpretarse en el gráfico de derecha a izquierda.

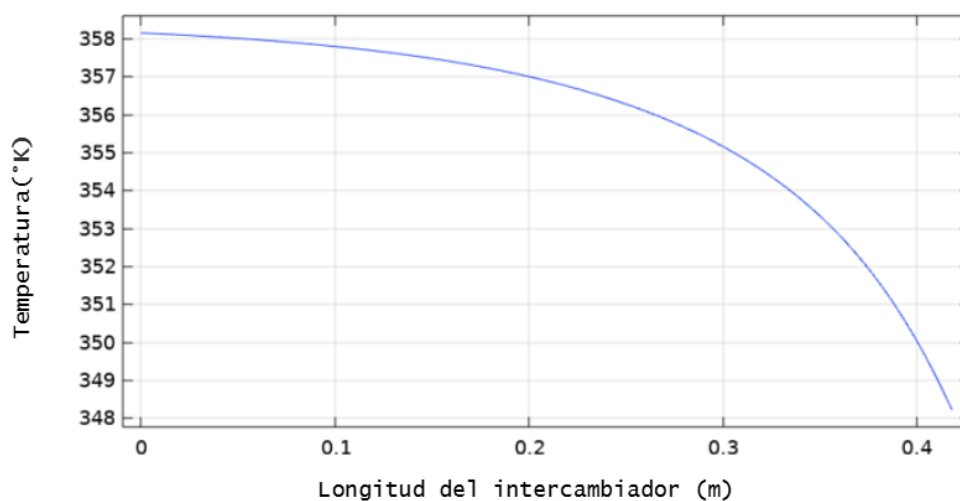


Figura 12: Evolución de la Temperatura del agua en el Intercambiador 2.

Puesto que los fluidos calientes tienen su condición de Dirichlet en la parte izquierda de los intercambiadores, la evolución de la Temperatura deberá de leerse de izquierda a derecha. Dicha lectura debe de entenderse para observar la evolución de la Temperatura del agua en la figura 12.

6.1.2.2 Resultados del Intercambiador de Calor 1

A partir de los resultados obtenidos en el intercambiador 2 y siguiendo el esquema de recirculación de fluidos entre los intercambiadores 1 y 2 (recuperación y calentamiento), es posible determinar el valor de la temperatura de entrada del fluido caliente en el intercambiador 1. De acuerdo con el diagrama de flujo representado en la figura 3, se establece que $T_{fs2} = T_{ce1}$.

De este modo, las temperaturas de entrada en el intercambiador 1 son las siguientes:

- Temperatura de entrada del fluido caliente (T_{ce1}) = 83,35°C
- Temperatura de entrada del fluido frío (T_{le}) = 15 °C

Posteriormente, tras la simulación, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Temperatura de salida del fluido frío (T_{fs1}) = 65 °C
- Temperatura de salida del fluido caliente (T_{cs1}) = 33,43 °C

Para calcular el calor obtenido en el intercambiador de calor 1 se adaptaron las ecuaciones 28 y 29 con el fin de obtener una integral que describa la energía total intercambiada en el proceso de recuperación, dicho cálculo queda descrito por la ecuación 30.

$$\int_{T_{fe_1}}^{T_{fs_1}} C_{p_L} dT \quad (30)$$

En la ecuación 30, el calor específico (mostrado como C_{p_L}) hace referencia al calor específico de la leche, y este viene dado por la ecuación 23. En la integral descrita el límite inferior de la misma es la Temperatura de entrada de la leche fría al intercambiador 1 (T_{fe_1}) mientras que el límite superior es la Temperatura de salida del intercambiador 1 de dicho fluido (T_{fs_1}). Finalmente, el calor total intercambiado en el proceso alcanzó un valor de 189,09 kJ/s

En las figuras 13 y 14 se representa la evolución de la Temperatura a lo largo del intercambiador 1 para ambos fluidos existentes.

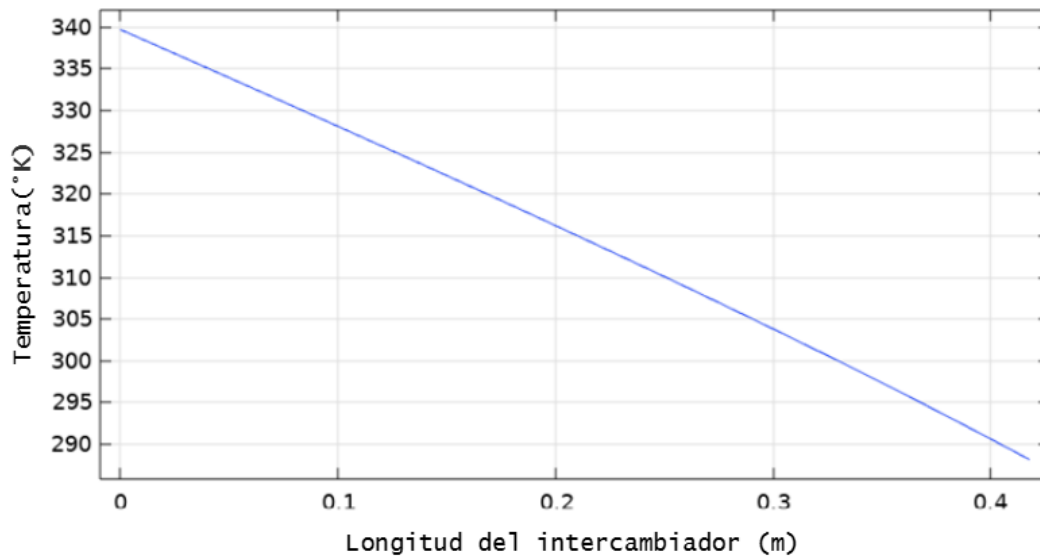


Figura 13: Evolución de la Temperatura del fluido frío en el intercambiador 1.

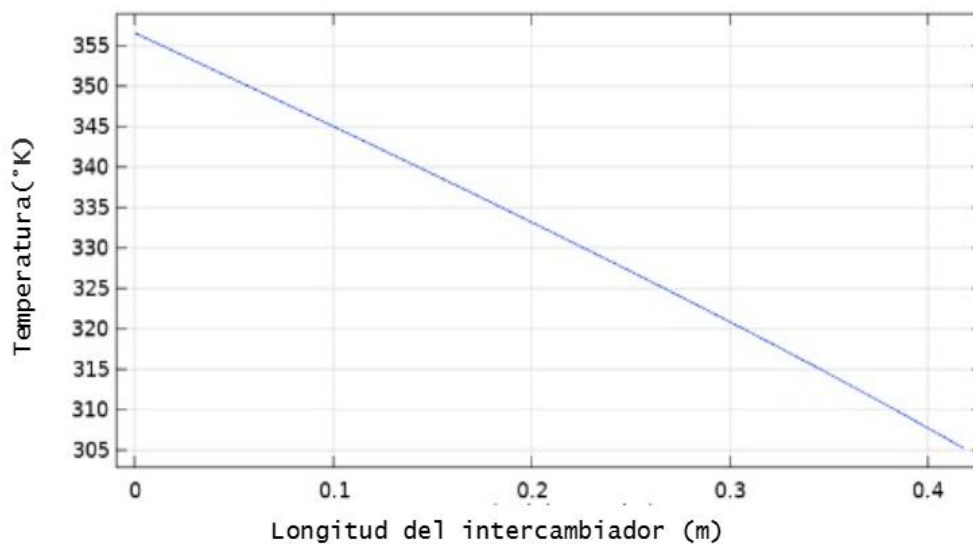


Figura 14: Evolución de la Temperatura del fluido caliente en el intercambiador de calor 1.

6.1.2.3 Resultados del Intercambiador de Calor 3.

A partir de los resultados obtenidos en el intercambiador 1 es posible determinar la temperatura de entrada del fluido caliente en el intercambiador 3, dado que, según se establece en la figura 3 y en el esquema de recirculación de fluidos, se cumple la relación $T_{cs1} = T_{ce3}$.

De esta forma, las variables de entrada al intercambiador 3 son:

- Temperatura de la leche (T_{ce3}) = 33,43 °C
- Temperatura del agua (T_{fe3}) = 1 °C

Posteriormente, tras la simulación, se obtuvieron los siguientes resultados:

- Temperatura de salida de la leche (T_{cs3}) = 4,28 °C
- Temperatura de salida del fluido frío (T_{fs3}) = 1,2 °C

Cabe destacar que, con la temperatura alcanzada en T_{cs3} , se cumple la restricción de temperatura establecida para garantizar la calidad del producto final (leche). Asimismo, el calor total intercambiado en el proceso asciende a 0,8417 kJ/s (calculado a partir de la ecuación 29). En las figuras 15 y 16 se representa la evolución de la Temperatura para los fluidos a lo largo del intercambiador de calor 3.

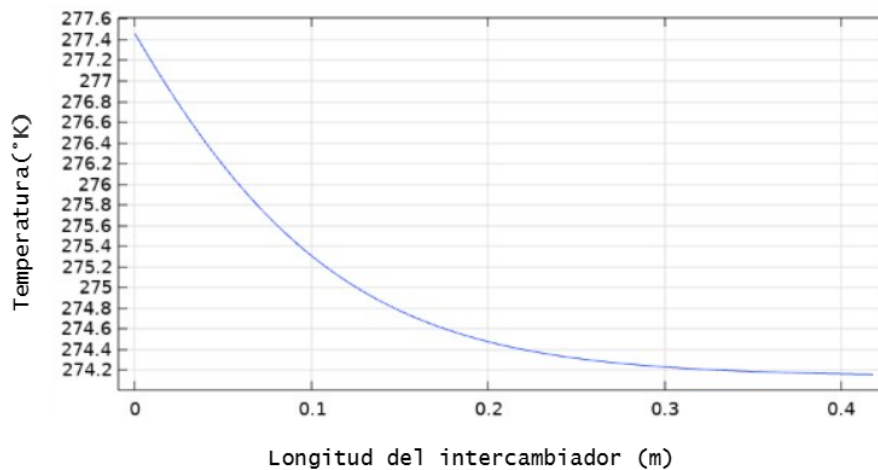


Figura 15: Evolución de la Temperatura del agua en el intercambiador 3.

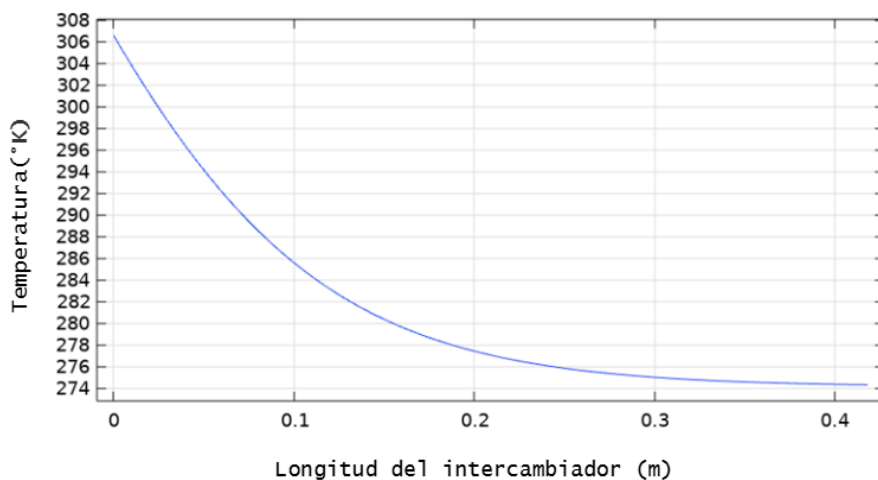


Figura 16: Evolución de la Temperatura de la leche en el intercambiador 3.

6.2 Resultados de la optimización

6.2.1 Método de optimización

Puesto que el problema de optimización que se desea resolver era no lineal (Función Objetivo No lineal y algunas restricciones no lineales), su resolución requiere de la aplicación de un método de optimización no lineal.

Para la optimización se ha empleado la función `fmincon` de MATLAB, una herramienta ampliamente utilizada para resolver problemas de optimización no lineales con restricciones.

Para poder optimizar el proceso de pasteurización se ha desarrollado el bloque de código 2, el cual asienta las bases y restricciones de la optimización para que las variables decisorias puedan cumplir con ello y se ejecuten en el proceso una vez obtenidos los resultados óptimos.

En el caso del presente trabajo, el objetivo es maximizar una determinada función relacionada con el rendimiento térmico del sistema de pasteurización. Dado que `fmincon` está diseñado para minimizar funciones, se ha aplicado una transformación algebraica consistente en multiplicar la función objetivo por -1 , de modo que maximizar una función se convierte en minimizar su opuesto.

```
1 function [x_opt, fval, Tfs1] = optimizacionproceso()
2     global Tfs1
3     Tle = evalin('base','Tle'); Tpasteur = evalin('base','Tpasteur'); mL = evalin('base','mL'); Tlfinal = evalin('base','Tlfinal');
4     lb = [0.01, 1.2, 70, 0, Tle]; ub = [2, 2, 100, 4, 0.9*Tpasteur]; x0 = [0.9554, 1.5, 94.7698, 0.2, 41.9406];
5     options = optimoptions(@fmincon, 'Algorithm', 'interior-point', 'MaxIterations', 1500, 'UseParallel', false, 'FunctionTolerance', 1e-10, 'OptimalityTolerance', 1e-4, ...
6         'Display', 'none', 'PlotFcn', @optimplotfval);
7
8     try [x_opt, fval] = fmincon(@(x)objective_function(x, Tle, mL), x0, [], [], [], [], lb, ub, @(x)constraints(x, Tpasteur, Tlfinal), options);
9     catch ME, fprintf('Error durante optimización: %s\n', ME.message); fprintf('Revisa valores iniciales o restricciones.\n'); end
10 end
11
12 function fo = objective_function(x, Tle, mL)
13     global Tfs2 Tcs3 Tfs1
14     mc2 = x(1); mf3 = x(2); Tce2 = x(3); Tfe3 = x(4); Tfe2 = x(5);
15     res = ejecucionproceso(mc2, mL, mf3, Tce2, Tle, Tfe3, Tfe2);
16     Tcs2 = res(3); Tfs3 = res(6); Tfs2 = res(4); Tcs3 = res(5); Tfs1 = res(2);
17     QC = integral(@CpC, Tcs2, Tce2); QF = integral(@CpC, Tfe3, Tfs3);
18     fo = -(QC + QF)/1000;
19 end
20
21 function [c, ceq] = constraints(x, Tpasteur, Tlfinal)
22     global Tfs2 Tcs3 Tfs1
23     c = [Tpasteur - Tfs2; Tcs3 - Tlfinal]; ceq = Tfs1 - x(5);
24 end
25
26 function print_results(x_opt, FO, Tle, mL, model1, model2, model3, fval)
27     fprintf('\n=== RESULTADOS ÓPTIMOS ===\n');
28     fprintf('• mc2: %.4f kg/s\n• mf3: %.4f kg/s\n• Tce2: %.2f°C\n• Tfe3: %.2f°C\n• FO máxima: %.2f W\n', x_opt(1), x_opt(2), x_opt(3), x_opt(4), FO);
29     res = ejecucionproceso(x_opt(1), mL, x_opt(2), x_opt(3), Tle, x_opt(4), x_opt(5));
30     fprintf('\n=== VERIFICACIÓN ===\nTfs2 = %.2f°C (>=72°C)\nTcs3 = %.2f°C (<=5°C)\n', res(4), res(6));
31     save('optimizacion_resultados.mat', 'x_opt', 'FO'); assignin('base', 'x_opt', x_opt); assignin('base', 'fval', fval);
32 end
```

Bloque de código 2: Optimización del proceso.

6.2.2 Optimización del proceso

Como *fmincon* aplica un método de optimización unimodal, es decir, asume que solo existe un mínimo en la función objetivo establecida, para el cálculo de valores óptimos en el intercambiador de calor se han llevado a cabo continuas ejecuciones del proceso de optimización, variando los valores iniciales de las variables decisorias.

Al igual que en la simulación, la puesta en marcha del proceso de optimización podía encontrar conflictos con caudales que fuesen excesivamente altos (causando una turbulencia excesiva en la sección) o extremadamente bajos (minimizando la transferencia de calor). Según muestra la Tabla 8, en MATLAB se probaron diversos caudales iniciales y se observó si bien estos convergían o no, y si en el caso de converger hacia que valores se acercaban (incremento o decremento del valor óptimo impreso por MATLAB respecto del valor inicial). De esta forma se asume que el resultado de la optimización es dependiente de los valores iniciales que se introduzcan (MathWorks, 2024).

Tabla 8

Valores de entrada en la optimización

Valor inicial del caudal frío (mF3-kg/s)	Valor inicial del caudal caliente (mC2-kg/s)	Convergencia	Tendencia
0,2	0,1	NO	-
0,4	0,25	SI	Al alza
0,5	0,4	SI	Al alza
0,7	0,65	SI	A la baja
1,3	1,1	NO	-

Para los valores iniciales de Temperatura (aunque se probaron también diversos valores) se consideró que no fue tan necesario realizar un estudio exhausto de convergencia puesto que estos se movían con mayor facilidad y sentido al estar sujetos a restricciones lineales como bien se expone en el apartado 5.3.3. De esta forma se seleccionaron los caudales que tras el estudio inicial se observaron mayormente convergentes (aquellos resaltados en azul claro en la Tabla 8) junto a las Temperaturas de entrada inicialmente supuestas para la simulación (valores los cuales arrojaban resultados que cumplieran con las restricciones), de esta forma los valores de entrada para la optimización definitiva del proceso fueron los siguientes:

$$m_{c2} = 0,4 \frac{kg}{s}; m_{Le} = 0,08 \frac{kg}{s}; m_{f3} = 0,5 \frac{kg}{s}; T_{ce2} = 85^{\circ}C$$

$$T_{Le} = 15^{\circ}C; T_{fe3} = 1^{\circ}C$$

En los valores mostrados cabe destacar que aquellos que se van a optimizar son los caudales de entrada a los intercambiadores 2 y 3 (m_{c2} y m_{f3}) y sus respectivas Temperaturas (T_{fe3} y T_{ce2}). El caudal de leche (m_{Le}) y su Temperatura (T_{Le}) no son valores optimizables y permanecerán fijos durante el proceso.

Esta decisión se ha llevado a cabo con el fin de poder obtener valores fijos de producto pasteurizado en todo momento y teniendo en cuenta que, además, no tendría sentido incrementar o decrementar la Temperatura de la leche de forma previa a un tratamiento térmico.

Como bien se indica al principio del apartado, en la estrategia de optimización se procedió a llevar a cabo varias optimizaciones con el fin de que el proceso quede estable. Dicha estrategia ha consistido en que una vez impresos una serie de valores óptimos por parte de MATLAB, estos mismos sean valores iniciales en la siguiente optimización, motivando así al programa a poder encontrar un nuevo mínimo en la función a partir de un mínimo ya calculado por el mismo. Una vez los valores óptimos no varíasen y MATLAB no encontrase un nuevo mínimo que superase (en valor absoluto) al anterior, se considerará que el proceso de optimización ha finalizado, y que, según los valores impresos en la última ejecución del código, se habrá encontrado una solución al problema de optimización.

6.2.2.1 Optimización 1

Tras ejecutar el bloque de código correspondiente a la optimización y tomando como valores iniciales los mostrados a continuación de la Tabla 8, MATLAB imprimió como óptimos los siguientes valores de las variables decisorias:

$$m_C = 0,5548 \frac{kg}{s}; T_{ce2} = 96,89^{\circ}C; m_F = 0,6302 \frac{kg}{s}; T_{fe3} = 0,015$$

A partir de los valores óptimos obtenidos en la primera optimización realizada en MATLAB, y tras la ejecución del estudio de simulación, se determinaron los siguientes resultados para las variables sujetas a restricciones:

- $T_{fs2} = 94,53^{\circ}C$
- $T_{cs3} = 1,32^{\circ}C$

Si bien las restricciones establecidas se cumplen en este caso, como bien se ha mencionado, se decidió repetir el proceso de optimización empleando los valores óptimos obtenidos como valores iniciales en el código, con el objetivo de mejorar el valor de la función objetivo.

El valor de la función obtenido en esta primera optimización es el mostrado en la figura 17, en ella se puede observar cómo evoluciona el mismo por iteración realizada.

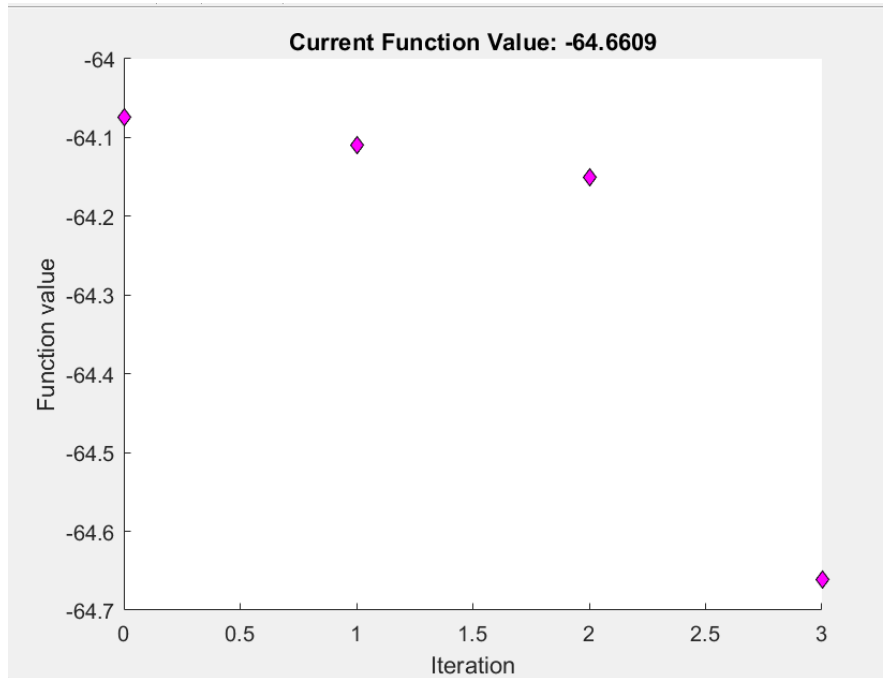


Figura 17: Valor de función por iteración en la optimización 1.

6.2.2.2 Optimización 2

Tras ejecutar esta segunda optimización las variables decisorias tomaron los siguientes valores como óptimos:

$$mC = 0,5797 \frac{kg}{s}; Tce_2 = 83,4423^{\circ}C; mF = 0,4695 \frac{kg}{s}; Tfe_3 = 0,15^{\circ}C;$$

El valor de función mejoró y se cumplieron las restricciones con la obtención de los siguientes valores tras ejecutar el estudio de simulación:

- Tfs2 = 81,65°C;
- Tcs3 = 4,9°C

En la figura 18 se puede observar la considerable mejora del valor de función (encontrando nuevos mínimos) que tuvo lugar en la segunda optimización.

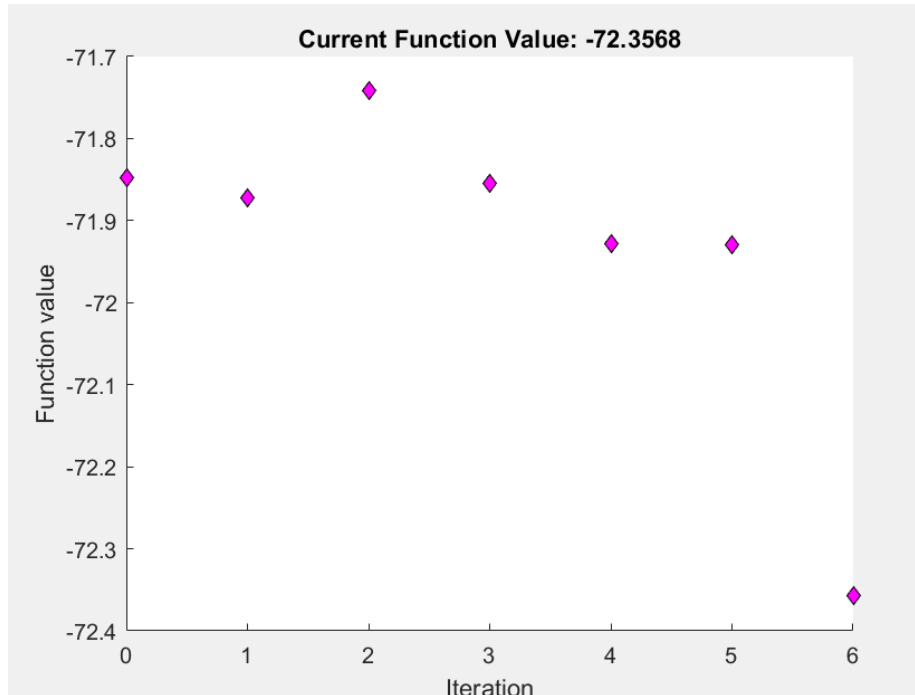


Figura 18: Valor de función por iteración en la optimización 2.

6.2.2.3 Optimización 3

Siguiendo la estrategia de optimización implementada en MATLAB, se realizó una tercera ejecución del script, utilizando como condiciones iniciales los valores óptimos obtenidos en la segunda optimización. Sin embargo, en esta nueva iteración no se observó un incremento en el valor absoluto de la función objetivo, ni tampoco una variación significativa en los valores óptimos, los cuales fueron los siguientes:

$$mC = 0.5787 \frac{kg}{s}; Tce_2 = 83.4523^\circ C; mF = 0.4693 \frac{kg}{s}; Tfe_3 = 0.15^\circ C;$$

6.2.3 Valores obtenidos tras la solución al problema de optimización

Finalmente, se consideraron los valores impresos como óptimos en la segunda ejecución del proceso como los ideales para la solución del problema de optimización. Una vez ejecutado el proceso con los valores óptimos obtenidos en dicha optimización (cuyos valores y resultados de las variables sujetas a restricciones se muestran en el apartado 6.2.2.2), se determinaron los siguientes resultados en relación con la energía intercambiada en cada intercambiador de calor a partir de las integrales usadas para el cálculo del calor intercambiado en los tres intercambiadores presentes (ecuaciones 28, 29 y 30):

- Energía intercambiada en el intercambiador 1: 190,02 kJ/s
- Energía intercambiada en el intercambiador 2: 41,97 kJ/s
- Energía intercambiada en el intercambiador 3: 1,47 kJ/s

6.3 Discusión de los resultados

6.3.1 Impacto de la optimización

La optimización permitió alcanzar el objetivo de maximizar la eficiencia en los dos intercambiadores de calor clave (intercambiadores 2 y 3), para los cuales se había configurado la función objetivo orientada a la maximización del calor transferido. Como resultado, en el proceso de calentamiento, la energía intercambiada aumentó de 37,77 kJ/s a 41,97 kJ/s, lo que representa un incremento del 11 % en la eficacia. Del mismo modo, en el intercambiador 3, la energía transferida pasó de 0,84 kJ/s a 1,17 kJ/s, lo que supone una mejora del 40 % en el rendimiento del sistema de refrigeración.

6.3.2 Limitaciones identificadas

Ha existido una gran limitación en el Intercambiador de calor 3 (enfriamiento). Mientras que en los otros dos intercambiadores los valores de calor transferido alcanzaban cifras por encima de los 40 kJ/s, en el Intercambiador de calor 3 no se ha llegado a alcanzar un valor de calor intercambiado superior a los 1,47 kJ/s.

Esto convierte al proceso de enfriamiento en un sistema poco eficiente el cual requiere de altos caudales y muy bajas Temperaturas para poder enfriar la leche según las restricciones impuestas.

Otra gran limitación identificada ha sido la imposibilidad de poder optimizar parámetros como ahora el ancho de canal en los intercambiadores o el Número Total de Placas, los elementos físico-estructurales tienen una gran repercusión en los resultados finales del proceso, no obstante, en el presente proyecto no se ha desarrollado una herramienta que pueda optimizar también el sistema fijándose en la estructura del pasteurizador y no solo en las variables de entrada.

6.3.3 Comparación de los resultados del estudio con los artículos de interés

Cabe destacar la gran similitud que existe en cuanto a la eficacia que supone el intercambiador de recuperación de calor, en el artículo de interés que se describió en el punto 3.3.2.1 el calor que se intercambiaba en el mismo supuso un 83,8% del calor intercambiado en todo el proceso.

En el caso del presente proyecto y tras los resultados de la optimización se puede afirmar que la energía transferida en el Intercambiador de calor 1 (Sistema de recuperación) supuso un 81,4% de la energía que se intercambiaba en todo el proceso.

En los dos artículos de interés mostrados en el punto 3.3.2 existía la presencia de un intercambiador de calor de recuperación, en este artículo dicha importancia ha quedado claramente reafirmada.

6.3.4 Reflexión sobre el estudio

En el desarrollo del Trabajo de Final de Grado se ha construido un modelo físico y computacional del proceso de pasteurización basado en la transferencia energética de calor que se produce entre sólidos y fluidos haciendo uso de las diversas funciones y leyes matemáticas que explican el comportamiento que tiene lugar entre los diversos materiales presentes. Sin embargo, es necesario reflexionar sobre los supuestos adoptados, así como la adaptación del modelo a COMSOL Multiphysics y MATLAB.

- A) Modelado de propiedades térmicas mediante funciones: Las propiedades físicas de los sólidos y los fluidos se han modelado como funciones polinómicas de la Temperatura, obtenidas a partir de literatura técnica. Aunque estas ecuaciones definen de forma correcta la variación térmica de los fluidos en el proceso introducen también un cierto grado de idealización que no tiene en cuenta posibles discontinuidades o efectos de la presión entre otras.
- B) Condiciones de contorno impuestas: En el modelo se han impuesto condiciones de contorno específicas que definen el aislamiento térmico en paredes laterales como derivadas parciales nulas o Temperaturas fijadas en condiciones Dirichlet, estas permiten cerrar el modelo matemáticamente, pero suponen una simplificación del entorno real, donde podrían existir pérdidas térmicas o inestabilidades de flujo.
- C) Representatividad del modelo: A pesar de las simplificaciones, los resultados muestran una coherencia física con el comportamiento esperado de un intercambiador de calor.

6.3.5 Implicaciones prácticas

El proceso de pasteurización de la leche, necesario para la inocuidad de la leche que se pueda usar tanto en consumo directo como en derivados lácteos (queso, mantequilla, ...), requiere de cambios rápidos de Temperatura, cambios que son más fáciles de conseguir en sistemas de intercambio de calor entre fluidos como el tratado en el presente estudio.

La optimización del proceso puede ayudar a diversas empresas del sector lácteo a ahorrar energía y abaratar costes de producción.

7. CONCLUSIONES

El trabajo logró simular y optimizar con éxito el proceso de pasteurización de la leche entera haciendo uso de un intercambiador de calor por placas junto a softwares informáticos como COMSOL Multiphysics y MATLAB.

La implementación del proceso de optimización permitió aumentar la eficacia de la operación cumpliendo con las condiciones térmicas de calentamiento y refrigeración requeridas.

El proyecto llevado a cabo demuestra la utilidad de la simulación y optimización de procesos térmicos en la industria alimentaria, abriendo una ventana a futuras investigaciones y exploraciones que incorporen más variables de diseño, análisis económico o validación experimental.

8. BIBLIOGRAFÍA

Naciones Unidas. (2015a). *Objetivo de Desarrollo Sostenible 2: Hambre cero*. <https://sdgs.un.org/goals/goal2>

Naciones Unidas. (2015b). *Objetivo de Desarrollo Sostenible 7: Energía asequible y no contaminante*. <https://sdgs.un.org/goals/goal7>

Naciones Unidas. (2015c). *Objetivo de Desarrollo Sostenible 12: Producción y consumo responsables*. <https://sdgs.un.org/goals/goal12>

World Health Organization. (2015). *Estimating the burden of foodborne diseases* [Informe técnico]. <https://www.who.int/activities/estimating-the-burden-of-foodborne-diseases>

Instituto Pasteur (Francia) y Organización Mundial de la Salud (OMS). (s.f). *Publicaciones técnicas y sanitarias relacionadas con la leche pasteurizada*.

Jay, J. M., Loessner, M. J., & Golden, D. A. (2005). *Modern food microbiology* (7th ed.). Springer.

El Buen Pastor. (s.f). *Leche UHT entera*. <https://elbuenpastorsl.com/portfolio-item/leche-uth-entera/>

Bon, J., Clemente, G., Vaquiro, H., & Mulet, A. (2010). *Simulation and optimization of milk pasteurization processes using a general process simulator (ProSimPlus)*. *Computers and Chemical Engineering*, 34(3), 414–420. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2009.11.013>

Thostrup, T. M., Pedersen, K. E., Tronci, S., & Errico, M. (2022). *Dynamic simulator and model predictive control of a milk pasteurizer* [PDF]. Disponible en <https://skoge.folk.ntnu.no/prost/proceedings/dycops-2022/files/0026.pdf>

Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (6.^a ed.). Wiley.

Hahn, D. W., & Özisik, M. N. (2012). *Heat Conduction* (3.^a ed.). Wiley.

Kaviany, M. (s.f) *Principles of Convective Heat Transfer*. Springer.

Ghiaasiaan, S. M. (s.f) *Convective Heat and Mass Transfer*. Cambridge University Press.

Saunders, E. A. D. (1988). *Heat exchangers: Selection, design, and construction*. Wiley.

Kumar, H. (1984). *1st U.K. National Conference on Heat Transfer, University of Leeds, July 3–5* (Inst. Chem. Symp. Ser. No. 86, p. 1275). Institution of Chemical Engineers.

The Engineering ToolBox. (2003). *Water density, specific weight and thermal expansion coefficients*. The Engineering ToolBox. https://www.engineeringtoolbox.com/water-density-specific-weight-d_595.html

COMSOL. (2016, marzo 15). *Detailed explanation of the finite element method (FEM)*. COMSOL. <https://www.comsol.com/multiphysics/finite-element-method>

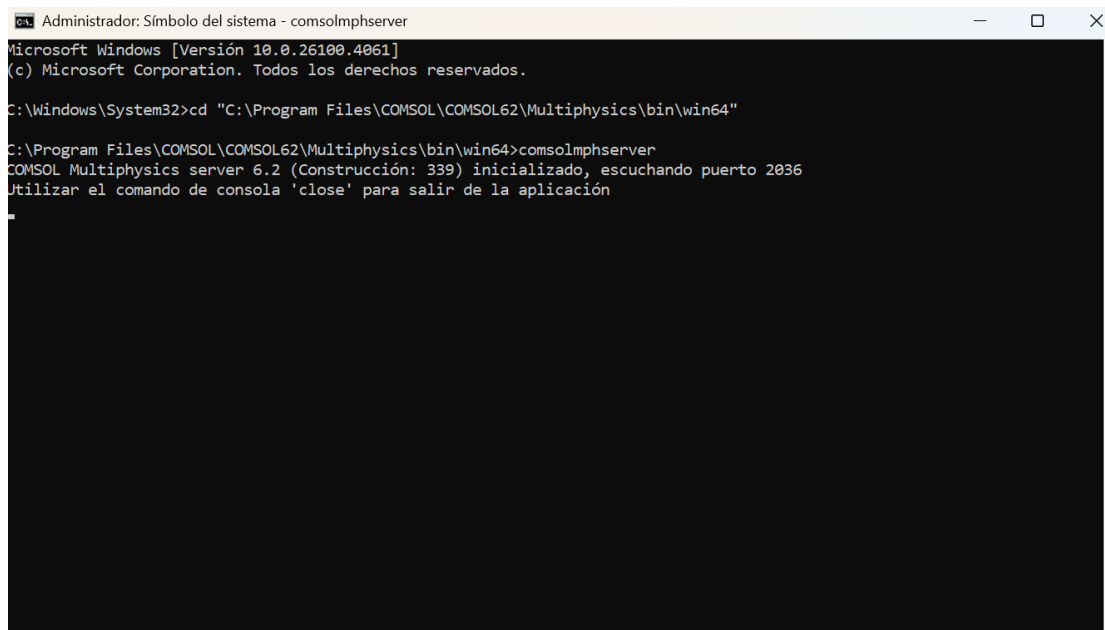
MathWorks. (2024). *Centro de ayuda de MATLAB*. MathWorks. https://es.mathworks.com/help/?s_tid=user_nav_help

9. ANEXOS

9.1 Interconexión MATLAB-COMSOL

Para poder crear la interconexión disponible entre COMSOL y MATLAB es necesario seguir las siguientes pautas:

1. Abrimos el comando en línea de Windows como administradores y nos dirigimos a la carpeta donde tenemos instalado COMSOL.
2. Una vez abierta la carpeta ejecutamos el comando *comsolmphserver*.
3. Esperamos y una vez se imprima el mensaje mostrado en la figura 19 sabremos que ya se ha establecido la conexión.



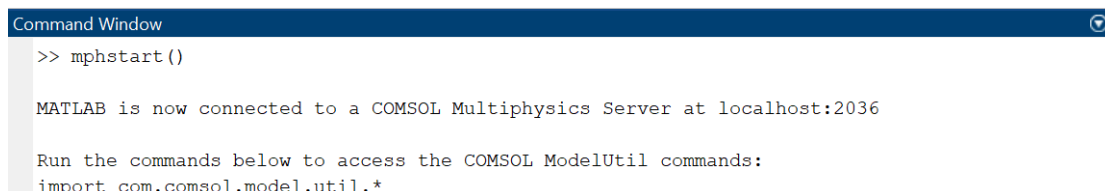
```
Administrador: Símbolo del sistema - comsolmphserver
Microsoft Windows [Versión 10.0.26100.4061]
(c) Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.

C:\Windows\System32>cd "C:\Program Files\COMSOL\COMSOL62\Multiphysics\bin\win64"

C:\Program Files\COMSOL\COMSOL62\Multiphysics\bin\win64>comsolmphserver
COMSOL Multiphysics server 6.2 (Construcción: 339) inicializado, escuchando puerto 2036
Utilizar el comando de consola 'close' para salir de la aplicación
```

Figura 19: Inicialización del servidor.

Una vez realizado este paso abrimos la consola de MATLAB y ejecutamos el comando *mphstart()*. Una vez ejecutado, MATLAB deberá de mostrarnos el puerto en el cual se escucha al servidor según se muestra en la figura 20.



```
Command Window
>> mphstart()

MATLAB is now connected to a COMSOL Multiphysics Server at localhost:2036

Run the commands below to access the COMSOL ModelUtil commands:
import com.comsol.model.util.*
```

Figura 20: Conexión al servidor desde MATLAB.

9.2 Cálculo del coeficiente global de transmisión de calor por convección.

El coeficiente global de transferencia de calor (U) representa la inversa de la suma total de las resistencias térmicas presentes en el proceso de intercambio. Este parámetro permite cuantificar, de manera global, la capacidad del sistema para facilitar la transferencia de calor entre los fluidos involucrados en el intercambiador.

Considerando el método genérico de incremento de Temperatura medio logarítmico para el cálculo del calor intercambiado en un intercambiador de calor, el coeficiente global se puede despejar de la ecuación correspondiente (ecuación 31) considerando A como el área total del intercambiador (área efectiva de cada placa por el número de placas menos 2), Q como la energía calorífica total intercambiada y el incremento de Temperatura medio logarítmico (ΔT_{lm}) en contracorriente.

$$Q = U \times A \times \Delta T_{lm} \quad (31)$$

De forma análoga se debe de calcular el incremento de Temperatura medio logarítmico (ΔT_{lm}) según la ecuación 32.

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{Ns} - T_{(N-1)e}) - (T_{Ne} - T_{(N-1)s})}{\ln \frac{(T_{Ns} - T_{(N-1)e})}{(T_{Ne} - T_{(N-1)s})}} \quad (32)$$

Para la ecuación 32 siendo N un número par, la temperatura de los fluidos calientes vendrá representada por T_N puesto que los fluidos calientes circulan por canales pares, mientras que la temperatura de los fluidos fríos vendrá representada por T_{N-1} dado que los fluidos fríos discurren por canales impares.