

Type of Article (Original article)

Optimización del Proceso de Separación de GLP mediante Intercambiadores de Placas Corrugadas en Instalaciones Venezolanas

Optimization of the LPG Separation Process using Corrugated Plate Exchangers in Venezuelan Facilities

Kelvin Cabrera^{1*}

¹ Investigador, Valencia, Venezuela

corresponding Author: kjrcabrera@gmail.com

Received: 27 July 2025

Revised: 3 August 2025

Accepted: 06 August 2025

Published: 30 August 2025

Inf. del art.	Resumen
Palabras Clave: Eficiencia Térmica, Gas Licuado, Optimización, Gas Licuado, Petróleo por Gas Licuado de Petróleo (GLP), Intercambiador de Placas Corrugadas	Contexto: La industria petrolera enfrenta desafíos significativos en eficiencia energética, especialmente en los procesos de separación de Gas Licuado de Petróleo (GLP). Los intercambiadores de calor tradicionales presentan limitaciones en rendimiento térmico y flexibilidad operativa. Aunque los intercambiadores de placas corrugadas (IPC) ofrecen ventajas superiores, existe una brecha en la literatura sobre su aplicación específica en procesos de GLP validada con datos operacionales reales, particularmente en contextos venezolanos. Objetivo: Este estudio tiene como objetivo diseñar e implementar intercambiadores de placas corrugadas para optimizar el proceso de separación de GLP, utilizando datos experimentales para validar la simulación y evaluar mejoras en la eficiencia térmica. Método: Se realizó una simulación computacional con Python-Hysys, calibrada con datos experimentales de procesos industriales reales. El diseño del IPC se basó en los métodos LMTD y NTU, considerando parámetros geométricos (ángulo de corrugación: 30–60°, espaciamiento: 4 mm, material: AISI 316L). La validación del modelo se realizó mediante comparación de temperaturas, presiones y flujos másicos, usando métricas como EMA, ECM y R². Se realizó análisis de sensibilidad y técnicas estadísticas (ANOVA, regresión). Resultados: El sistema alcanzó una eficiencia térmica del 95.80%, transfirió 142,26 kW de potencia y redujo la temperatura del GLP en 25,87 °C. La configuración optimizada mostró un NTU de 4,36 y eficiencias superiores al 98% en ciertas condiciones. El análisis de sensibilidad confirmó que la eficiencia aumenta con más placas y disminuye con mayores flujos de GLP. Conclusiones: La implementación de intercambiadores de placas corrugadas es una solución viable y validada experimentalmente para optimizar procesos de separación de GLP, con importantes implicaciones para la modernización industrial y la sostenibilidad energética.

Article info	Abstract
Key words: Thermal Efficiency, Liquefied Gas, Optimization,	Background: The oil industry faces significant challenges in energy efficiency, especially in Liquefied Petroleum Gas (LPG) separation processes. Traditional heat exchangers have limitations in thermal performance and operational flexibility. Although corrugated plate heat exchangers (CPI) offer superior advantages, there is a gap in the literature on their specific application in LPG processes validated with real operational data, particularly in Venezuelan contexts. Objective: This study aims to design and implement corrugated plate heat exchangers to optimize the LPG separation process, using experimental data to validate the simulation and evaluate improvements in thermal efficiency. Method: A computational simulation was performed with Python-Hysys, calibrated with experimental data from real industrial processes. The IPC design was based on LMTD and NTU methods, considering geometrical parameters (corrugation angle: 30-60°, spacing: 4



<i>Liquefied Gas, Liquefied Petroleum Gas (LPG), Corrugated Plate Heat Exchanger</i>	mm, material: AISI 316L). Model validation was performed by comparing temperatures, pressures and mass flows, using metrics such as EMA, ECM and R ² . Sensitivity analysis and statistical techniques (ANOVA, regression) were performed. <i>Results:</i> The system achieved a thermal efficiency of 95.80%, transferred 142.26 kW of power and reduced the LPG temperature by 25.87 °C. The optimized configuration showed an NTU of 4.36 and efficiencies above 98% under certain conditions. Sensitivity analysis confirmed that efficiency increases with more plates and decreases with higher LPG flows. <i>Conclusions:</i> The implementation of corrugated plate exchangers is a viable and experimentally validated solution to optimize LPG separation processes, with important implications for industrial modernization and energy sustainability.
--	---

1. Introducción

La creciente demanda global de energía y la necesidad imperante de procesos industriales más eficientes continúan impulsando el desarrollo acelerado de tecnologías de transferencia de calor avanzadas. En el complejo panorama de la industria petrolera y petroquímica, los procesos de separación representan una proporción significativa del consumo energético total, siendo la separación de Gas Licuado de Petróleo (GLP) uno de los procesos más intensivos en términos energéticos y críticos para la eficiencia operativa general. Los intercambiadores de calor, como componentes fundamentales en estos procesos, ejercen una influencia directa y determinante en la eficiencia energética global del sistema, convirtiéndolos en elementos estratégicos para la operación efectiva de las instalaciones [1] [2].

Los intercambiadores de tubo y coraza tradicionales, aunque ampliamente utilizados y consolidados en la industria, presentan limitaciones inherentes y persistentes que impactan negativamente en su desempeño operativo. Entre estas limitaciones se destacan coeficientes de transferencia de calor relativamente bajos, que requieren superficies de intercambio extensas y voluminosas; dificultades operativas asociadas al mantenimiento, especialmente en entornos corrosivos típicos de la industria petrolera; y el ensuciamiento térmico progresivo, que deteriora su rendimiento a lo largo del tiempo [3] [4]. Estas limitaciones se traducen inevitablemente en una menor eficiencia operativa y un consumo energético subóptimo que afecta el desempeño general de las instalaciones. En marcado contraste, los intercambiadores de placas corrugadas (IPC) han emergido como una alternativa tecnológicamente superior. Su diseño innovador ofrece ventajas distintivas: una mayor área de superficie específica por unidad de volumen, lo que permite equipos más compactos; coeficientes de transferencia de calor significativamente mejorados gracias a la turbulencia controlada generada por su geometría corrugada, que rompe las capas límite térmicas y facilita la transferencia de energía; y una flexibilidad operativa y modular excepcional que permite fácil expansión, modificación y mantenimiento [5] [6] [7]. La geometría corrugada de las placas no solo maximiza la turbulencia del flujo, sino que también crea canales de flujo optimizados que resultan en coeficientes de transferencia de calor considerablemente más altos comparados con diseños convencionales, traducándose directamente en equipos más pequeños y eficientes [8] [9] [10].

La optimización de redes de intercambiadores de calor ha sido ampliamente estudiada en la literatura técnica especializada, reconociéndose su importancia crítica para minimizar el consumo energético y maximizar la recuperación de calor residual [1] [2]. Recientemente, diversos trabajos de investigación han demostrado mejoras del 15 al 25 por ciento en eficiencia térmica mediante la aplicación específica de intercambiadores de placas en procesos de separación [8] [9]. No obstante, persiste una brecha significativa en la investigación aplicada que vincule directamente el diseño específico de intercambiadores de placas corrugadas con la optimización de procesos de separación de GLP en condiciones operativas reales y representativas de instalaciones industriales, especialmente en contextos regionales con características particulares [11] [4] [12]. El problema de investigación se centra con precisión en la necesidad de desarrollar y validar experimentalmente metodologías de diseño específicas para intercambiadores de placas corrugadas que maximicen la eficiencia térmica en procesos de separación de GLP, considerando aspectos térmicos, hidráulicos, materiales y operativos.

La separación de GLP representa un desafío técnico significativo debido a las propiedades físicas similares de los componentes involucrados, principalmente propano y butano. Este proceso requiere una destilación precisa y un control de temperatura riguroso para alcanzar las purezas comerciales necesarias. La cadena de separación comienza con un pre-enfriamiento del GLP proveniente de etapas anteriores, seguido por una o más etapas de destilación fraccionada donde se separan propano y butano mediante la gestión cuidadosa de gradientes térmicos [13]. Finalmente, el producto separado puede requerir un ligero calentamiento antes del almacenamiento. Los intercambiadores de calor juegan un papel crucial en cada una de estas etapas, especialmente en el pre-enfriamiento y en la recuperación de calor entre etapas para reducir la carga energética total [14]. Factores críticos como las condiciones de operación específicas, la



composición variable de las corrientes de proceso (principalmente propano y butano), los requerimientos de pureza rigurosos, y las condiciones de cambio de fase, influyen directamente en el diseño óptimo del sistema de intercambio térmico y requieren un enfoque especializado.

La selección inadecuada del tipo de intercambiador puede resultar en ineficiencias energéticas, problemas de control del proceso, e incluso riesgos operacionales asociados a temperaturas inadecuadas en procesos criogénicos o de alta presión [15] [16]. Por ejemplo, temperaturas de salida del GLP demasiado altas pueden comprometer la eficiencia de la separación en columnas subsiguientes, mientras que temperaturas demasiado bajas o fluctuaciones bruscas pueden inducir condensación no deseada o problemas mecánicos.

La tecnología de intercambiadores de placas corrugadas ofrece ventajas distintivas que la hacen particularmente adecuada para aplicaciones en procesos de separación de GLP [17]. Su diseño modular permite fácil expansión o modificación según las necesidades cambiantes del proceso, adaptándose a nuevas condiciones operativas o aumentos de capacidad. La alta eficiencia térmica se traduce directamente en menor requerimiento de energía para calentamiento o enfriamiento [18]. Además, la facilidad de desmontaje para inspección puede reducir los tiempos de parada no planificada y mejorar la disponibilidad del sistema. Desde el punto de vista de la confiabilidad, los materiales resistentes a la corrosión como el AISI 316L, comúnmente utilizados en la construcción de IPC, son adecuados para el ambiente químico del GLP [7] [19]. La geometría de las placas y los empaques deben ser cuidadosamente seleccionados para resistir las presiones y temperaturas del proceso y minimizar el riesgo de fugas.

La simulación computacional se ha establecido como una herramienta fundamental e indispensable en el diseño y optimización de sistemas de intercambio térmico modernos. Herramientas especializadas permiten modelar con precisión los complejos procesos de separación [20] [15] [21], evaluar diferentes configuraciones de intercambiadores y predecir el comportamiento del sistema bajo diversas condiciones operativas sin necesidad de pruebas físicas costosas [22] [12]. La validación de estos modelos con datos experimentales precisos es crucial para garantizar la confiabilidad de las predicciones y la aplicabilidad directa de los resultados en condiciones reales de operación industrial [2] [6]. Considerando el contexto actual de transición energética global y sostenibilidad, la eficiencia en los procesos de separación de GLP adquiere una relevancia estratégica particular.

El GLP constituye una fuente de energía limpia, versátil y de alta eficiencia que puede desempeñar un papel importante en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Optimizar los procesos de producción y separación de GLP no solo mejora la eficiencia operativa de las instalaciones, sino que también contribuye directamente a objetivos ambientales más amplios relacionados con la reducción del consumo energético y las emisiones asociadas, alineándose con las metas de sostenibilidad corporativa y regulaciones ambientales cada vez más estrictas [1] [23].

Este artículo se organiza de la siguiente manera: la sección de Revisión Literaria presenta un análisis del estado del arte sobre tecnologías de intercambio térmico y estudios previos en procesos de separación de GLP. A continuación, en la sección de Metodología, se detalla el enfoque de investigación, la caracterización del proceso, la recolección de datos experimentales y el modelo de simulación. Las secciones de Resultados y Discusión presentan y analizan los hallazgos clave, incluyendo el desempeño térmico, la validación del modelo y el análisis de sensibilidad. Finalmente, la Conclusión resume los aportes del estudio, sus limitaciones y recomendaciones para futuras investigaciones.

2. Revisión Literaria

Nguyen et al. [5]. Evaluaron el rendimiento térmico e hidráulico de un nuevo diseño de intercambiador de placas con corrugaciones en perfil aerodinámico tipo airfoil (NACA), comparándolo con los intercambiadores comerciales de corrugación sinusoidal y analizar el efecto de parámetros geométricos. Utilizaron simulaciones numéricas (CFD) para analizar diferentes configuraciones geométricas (ángulo de corrugación, perfil NACA, paso de corrugación y disposición de placas) en un rango de Reynolds entre 4.600 y 8.400. Se evaluaron parámetros como el coeficiente global de transferencia de calor (OHTC), caída de presión y el criterio de evaluación de desempeño (PEC). Los hallazgos demostraron que el diseño con perfil airfoil redujo un 17 % la caída de presión respecto al diseño sinusoidal, manteniendo la misma transferencia de calor. El ángulo óptimo fue 60° (10 % más eficiente que 30° y 90°). El perfil NACA 0030 mostró el mayor OHTC (12 % superior a NACA 0020 y 0025), aunque con un aumento del 33,7 % en la caída de presión. La configuración óptima (NACA 0030, 60°, paso de 3,14 mm, disposición simple) alcanzó un PEC de 1,08. Sin embargo, dentro de sus limitaciones se puede evidenciar que no hubo validación experimental; solo se consideró flujo monofásico y turbulento en condiciones ideales. No se evaluaron



efectos de ensuciamiento, corrosión, materiales ni condiciones reales de operación industrial, como las presentes en plantas de separación de GLP en Venezuela.

Asimismo, Bhattad et al. [2], desarrollaron un procedimiento iterativo simplificado y confiable para estimar las temperaturas de salida de los fluidos en un intercambiador de placas tipo cheurón (CPHE), utilizando el método de la diferencia logarítmica media de temperaturas (LMTD). Los autores propusieron un enfoque iterativo basado en las ecuaciones fundamentales de transferencia de calor y LMTD. El modelo utiliza como entrada las temperaturas y flujos másicos de entrada, y predice las temperaturas de salida de los fluidos caliente y frío. El método fue validado comparando los resultados simulados con datos experimentales obtenidos de pruebas en un CPHE. Los hallazgos demostraron alta precisión, con errores relativos entre el 1.8% y el 2.6% para la temperatura de salida del fluido frío y entre el 2.4% y el 3.5% para el fluido caliente. El estudio concluye que este enfoque permite evaluar de manera rápida y confiable el desempeño del intercambiador, reduciendo la necesidad de pruebas experimentales costosas y prolongadas.

Dentro de las limitaciones del estudio, el estudio se centra en un análisis térmico simplificado y no considera efectos hidráulicos complejos, como la distribución no uniforme del flujo entre canales o el ensuciamiento. Además, su validación se limita a condiciones de operación específicas, lo que puede restringir su aplicabilidad directa a procesos con flujos bifásicos o fluidos de composición variable, como en la separación de GLP.

De igual manera Aboul Khail [6], en su trabajo propusieron una nueva geometría de placa para intercambiadores de calor que mejore su desempeño térmico e hidráulico en comparación con diseños comerciales y otros modelos innovadores recientes. Realizaron un análisis numérico mediante simulaciones computacionales (CFD) utilizando el software ANSYS Fluent, bajo condiciones de flujo contracorriente y régimen turbulento. Se modeló un intercambiador de placas con una nueva geometría de corrugación, evaluándose sus características térmicas e hidrodinámicas en un rango de número de Reynolds entre 500 y 5000. Se empleó el modelo de turbulencia SST $k-\omega$ para capturar con precisión el comportamiento del flujo. Los parámetros clave analizados fueron el número de Nusselt (Nu), el coeficiente de fricción (f) y el índice de desempeño ($Nu/f^{1/3}$). Los resultados numéricos fueron validados mediante un método analítico desarrollado ad hoc. Los hallazgos mostraron un incremento promedio del 28 % en el número de Nusselt y del 40 % en el desempeño general ($Nu/f^{1/3}$) en comparación con placas comerciales de tipo chevron y otros diseños recientes. Estos resultados indican una mejora significativa en la eficiencia térmica sin un incremento desproporcionado de la caída de presión, lo que sugiere un mejor equilibrio entre transferencia de calor y pérdidas de carga. Dentro de las limitaciones del estudio, se evidencia que carece de validación experimental con prototipos físicos, lo que limita la confirmación de los resultados en condiciones reales. Además, las simulaciones se limitaron a flujo monofásico y a un rango moderado de Reynolds, sin considerar condiciones de operación más complejas, como flujos bifásicos, altas presiones o variaciones térmicas extremas, que son comunes en procesos industriales como la separación de GLP. Tampoco se analizan aspectos prácticos como la fabricación, resistencia mecánica, ensuciamiento o compatibilidad con fluidos agresivos presentes en instalaciones petroleras.

El trabajo de Petro Kasputenko [1], revisó los avances recientes en el diseño y funcionamiento de intercambiadores de placas para aplicaciones de condensación, analizar estrategias de mejora del rendimiento térmico e hidráulico, y proponer líneas futuras de desarrollo con impacto económico y ambiental. Estudio de revisión analiza investigaciones recientes sobre transferencia de calor y caída de presión en flujos bifásicos dentro de canales de PHE con diferentes geometrías de corrugación. Se examinan enfoques basados en modelado numérico, optimización paramétrica y diseño experimental, con especial atención a las condiciones de baja caída de presión permitida en corrientes gaseosas. Además, se discuten las diferencias en el comportamiento del flujo bifásico en canales de placas frente a tubos convencionales. Los hallazgos presentaron ventajas significativas en procesos de condensación debido a su alta área superficial por unidad de volumen, lo que favorece una transferencia de calor eficiente. Las geometrías de corrugación influyen notablemente en el patrón de flujo bifásico, promoviendo una mejor distribución del líquido y reduciendo la acumulación de vapor. Estudios recientes indican que ciertos ángulos de corrugación y disposiciones en espejo (mixed chevron) optimizan el equilibrio entre transferencia de calor y pérdida de carga. Asimismo, el uso de modelos CFD y correlaciones empíricas mejoradas ha permitido predecir con mayor precisión el desempeño en condiciones de condensación. El trabajo resalta que la optimización de PHE en estos procesos puede generar ahorros energéticos importantes, reduciendo tanto el consumo de combustible como la huella de carbono. La falta de estudios de campo en instalaciones existentes limita la transferibilidad directa de las recomendaciones a escenarios industriales reales, especialmente en contextos con desafíos técnicos y económicos como los venezolanos.

M. M. Shah [4]. Evaluó la precisión de las correlaciones existentes para la transferencia de calor en condensación dentro de PHE y desarrollar una nueva correlación más precisa y aplicable a una amplia gama de condiciones operativas y geometrías. Recopiló y analizó un extenso conjunto de datos experimentales provenientes de 25 fuentes bibliográficas distintas, cubriendo una diversidad de fluidos (agua, amoníaco, hidrocarburos y refrigerantes halogenados), ángulos de corrugación (30° a 75°), presiones reducidas (0,0083 a 0,8), y flujos máscicos (2,3 a 165 kg/m²s). Estos datos fueron comparados con 11 correlaciones térmicas publicadas previamente. A partir de este análisis, se propuso una nueva correlación, derivada de la modificación de la de Longo et al., optimizada para mejorar la precisión predictiva. Los hallazgos demostraron que solo dos de las 11 correlaciones evaluadas mostraron un acuerdo razonable con los datos experimentales, mientras que las demás presentaron desviaciones significativas, lo que pone de manifiesto la falta de universalidad en las herramientas disponibles. La nueva correlación propuesta reduce la desviación media absoluta a 19,5 % para ángulos de corrugación entre 40° y 65° , mostrando una mejor precisión y simplicidad de uso en comparación con las existentes. Este avance representa una herramienta valiosa para el diseño y simulación de PHE en procesos de condensación, especialmente en aplicaciones industriales donde intervienen hidrocarburos.

Limitaciones: Aunque el estudio abarca una amplia variedad de fluidos y condiciones, no todos los datos corresponden a mezclas reales de hidrocarburos complejas, como las presentes en el gas natural venezolano. Además, la correlación se validó principalmente con datos de laboratorio o instalaciones controladas, muchas de ellas en contextos de refrigeración o climatización, no en plantas de proceso de gas. No se consideran factores operativos comunes en instalaciones industriales envejecidas, como el ensuciamiento, la corrosión o fluctuaciones en la composición del fluido, que pueden afectar significativamente el rendimiento real de los intercambiadores. Asimismo, la correlación no aborda explícitamente el rendimiento hidráulico (caída de presión), lo que limita su uso integral en optimizaciones energéticas.

Wu et al. (2021) [3]. Propusieron una metodología de optimización para la integración de PHE en trenes de precalentamiento de crudo, enfocada en la mitigación del ensuciamiento mediante el control de la distribución de velocidades y la selección óptima de ubicaciones para reemplazar intercambiadores convencionales. Se desarrollaron un modelo de correlación de velocidad adaptado específicamente para PHE, integrado en un marco de optimización dinámica que considera la evolución del ensuciamiento a lo largo del tiempo. El horizonte de operación se dividió en intervalos temporales para capturar el comportamiento no estacionario del ensuciamiento. Se empleó el algoritmo de Simulated Annealing (SA) como técnica de optimización para determinar la configuración óptima de velocidades y las posiciones más adecuadas para insertar PHE en lugar de STHE, maximizando la eficiencia térmica y minimizando las pérdidas por ensuciamiento y caída de presión. La implementación de PHE en puntos estratégicos del tren de precalentamiento permitió una mejor gestión del ensuciamiento gracias a las altas velocidades de flujo y al diseño turbulento inducido por las placas corrugadas, que reducen la deposición de compuestos. El modelo de optimización mostró que ajustar la velocidad dentro de los PHE no solo disminuye las tasas de ensuciamiento, sino que también mejora la transferencia de calor sin comprometer excesivamente la caída de presión. El estudio de caso demostró una mejora significativa en la eficiencia del sistema, con extensiones del periodo de operación entre limpiezas y reducción de paradas no programadas. El estudio se centra en refinerías de crudo, donde las condiciones de operación, composición del fluido y niveles de impurezas difieren notablemente de las plantas de separación de gas natural, como las presentes en Venezuela. Además, no se consideran fluidos bifásicos ni condiciones de baja presión típicas del procesamiento de gas, lo que limita la transferibilidad directa de los resultados. Tampoco se analiza el impacto de la corrosión asociada a compuestos como H₂S o CO₂, común en yacimientos venezolanos, ni los desafíos de disponibilidad de repuestos, mantenimiento o condiciones operativas inestables en infraestructuras envejecidas. Por otro lado, el uso de SA, aunque efectivo, puede requerir altos costos computacionales y no garantiza siempre la solución global óptima en sistemas complejos. Este trabajo responde a dichas brechas mediante un diseño de IPC validado experimentalmente con datos operacionales reales de plantas venezolanas, integrando simulación (Python-Hysys), análisis de sensibilidad y especificaciones técnicas aplicables a condiciones industriales reales.

2.1 Identificación de Brechas

A partir del análisis crítico de los estudios previos revisados [5] [6] [1] [4] y [3] se identifican claramente varias brechas significativas que justifican la necesidad del presente estudio sobre la Optimización del Proceso de Separación de GLP mediante Intercambiadores de Placas Corrugadas en Instalaciones Venezolanas.



En primer lugar, existe una marcada falta de estudios aplicados en contextos específicos de procesamiento de gas natural, especialmente en regiones con condiciones operativas y técnicas particulares como Venezuela. La mayoría de las investigaciones se centran en aplicaciones generales refrigeración, precalentamiento de crudo o entornos controlados de laboratorio y no abordan directamente el proceso de separación de gases licuados del petróleo (GLP), que involucra mezclas complejas de hidrocarburos ligeros (propano, butano) en condiciones de alta presión y bajas temperaturas, con flujos bifásicos y alta sensibilidad a cambios térmicos y de presión.

En segundo lugar, aunque se han desarrollado modelos avanzados de transferencia de calor y correlaciones térmicas [4], su validación se realiza predominantemente con fluidos puros o condiciones ideales, sin considerar la composición variable y del gas licuado de petróleo venezolano, que frecuentemente contiene altos niveles de CO₂ y humedad, factores que aceleran la corrosión y el ensuciamiento. Esta limitación reduce la aplicabilidad de dichas correlaciones en instalaciones reales, donde el rendimiento de los intercambiadores puede degradarse rápidamente si no se diseñan con estos factores en cuenta.

Asimismo, si bien se han propuesto nuevas geometrías de placas [5] [6] que mejoran el rendimiento térmico e hidráulico, estas innovaciones carecen de validación experimental en escenarios industriales reales, especialmente en plantas con infraestructura no actualizada, mantenimiento limitado y fluctuaciones operativas constantes. Además, no se han adaptado a las restricciones técnicas, económicas y logísticas que enfrentan las instalaciones venezolanas, como la disponibilidad de materiales, repuestos o equipos de monitoreo modernos.

Otra brecha crítica es la falta de integración entre optimización térmica, mitigación de ensuciamiento y condiciones operativas dinámicas en el sector del gas. Aunque [3] proponen una metodología robusta para reducir el ensuciamiento en refinerías mediante PHE, su enfoque no es directamente transferible a plantas de GLP, donde los fluidos, las presiones, las temperaturas y los regímenes de flujo son distintos. Tampoco se han desarrollado estrategias de optimización que combinen el control de velocidad, la selección de ángulos de corrugación y la disposición de placas en función de las características específicas del proceso de separación de GLP.

Finalmente, no existe en la literatura una propuesta integral que combine diseño de PHE, modelado térmico, análisis de desempeño bajo condiciones reales y adaptación tecnológica al entorno venezolano. Los estudios revisados ofrecen avances geométricos, predictivos o metodológicos, pero ninguno aborda de forma holística la cadena de valor operativa en las plantas nacionales, donde la eficiencia energética, la disponibilidad de equipos y la sostenibilidad del proceso son desafíos constantes.

Por lo tanto, esta investigación se posiciona como una contribución necesaria y oportuna, al cerrar estas brechas mediante una optimización aplicada, contextualizada y técnicamente viable del proceso de separación de GLP, utilizando intercambiadores de placas corrugadas diseñados y operados bajo las condiciones reales de las instalaciones venezolanas. El estudio no solo adopta avances científicos recientes, sino que los adapta, valida y optimiza para un entorno con altas demandas operativas y limitados recursos, aportando soluciones con impacto directo en la eficiencia, seguridad y sostenibilidad del sector energético nacional.

No se han desarrollado estrategias de optimización que combinen el control de velocidad, la selección de ángulos de corrugación y la disposición de placas en función de las características específicas del proceso de separación de GLP.

2.2 Justificación del Estudio

El estudio se justifica por la necesidad de llenar estas lagunas identificadas. Específicamente, busca:

- Diseñar e implementar intercambiadores de placas corrugadas optimizados para el proceso específico de separación de GLP en Venezuela, considerando condiciones operativas y características del fluido locales.
- Validar experimentalmente la simulación computacional con datos operacionales reales de instalaciones venezolanas, algo que la literatura existente carece para este contexto específico.
- Evaluar y cuantificar las mejoras reales en eficiencia térmica que se pueden lograr con IPCs en este proceso particular, considerando las condiciones locales.

Proporcionar una metodología de diseño validada y parámetros específicos (geométricos, operativos) que puedan ser aplicados directamente por la industria local.



El estudio se justifica porque aborda una aplicación específica (separación de GLP en Venezuela) con validación real, integrando conocimientos teóricos existentes (como el método LMTD de Bhattad [2] y considerando necesidades identificadas en la literatura (como geometrías específicas y validación en condiciones relevantes) pero no resueltas para este contexto particular.

3. Metodología

El presente estudio empleó una metodología mixta de tipo explicativo con enfoque cuantitativo, centrada en el diseño, simulación y validación experimental de intercambiadores de placas corrugadas para la optimización del proceso de separación de Gas Licuado de Petróleo (GLP). La investigación se estructuró en tres fases principales: (1) caracterización del proceso de separación de GLP y obtención de datos experimentales, (2) diseño y simulación de intercambiadores de placas corrugadas, y (3) análisis comparativo de desempeño térmico y validación del modelo. Véase la Figura 1. Secuencia metodológica de las fases de investigación, desde la caracterización hasta la validación y presentación de resultados.

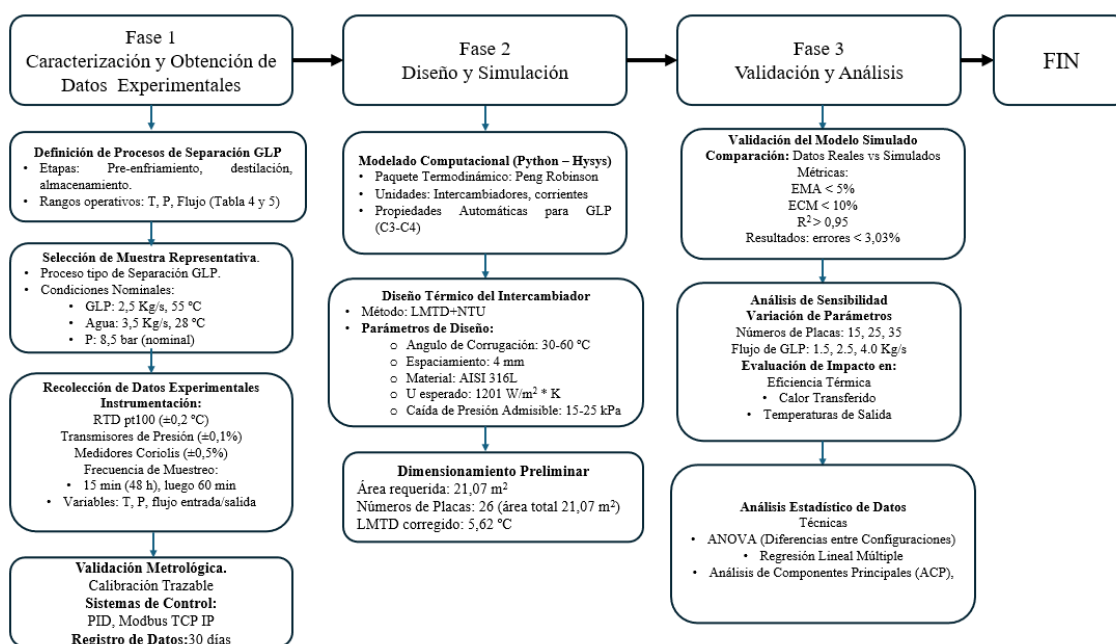


Figura 1 Diagrama de Flujo Metodológico

La población objeto de estudio comprendió los procesos industriales de separación de GLP en instalaciones de procesamiento de gas natural, considerando condiciones operativas representativas de la industria venezolana. Para la presente investigación, se seleccionó una muestra específica consistente en un proceso de separación de GLP tipo, basado en datos experimentales obtenidos durante la experiencia profesional del investigador en procesos petroquímicos. Esta muestra incluyó parámetros operativos como temperaturas de entrada de GLP de 55 °C, flujos máscos de GLP de 2,5 kg/s y agua de 3,5 kg/s, y una temperatura de entrada de agua de 28 °C. La selección de esta muestra permitió establecer una base realista para el diseño y posterior validación del sistema de intercambio térmico propuesto.

Para la recolección de datos experimentales, se utilizaron instrumentos especializados que incluyeron sensores de temperatura tipo RTD Pt100 con precisión de $\pm 0,2$ °C, transmisores de presión piezoeléctricos con precisión de $\pm 0,1$ % del rango, medidores de flujo máscico tipo Coriolis con exactitud de $\pm 0,5$ %, y manómetros digitales. La calibración de todos los instrumentos se realizó según procedimientos reconocidos internacionalmente, asegurando trazabilidad metrológica. Además, se emplearon registradores de datos automáticos para la captura continua de variables operativas durante periodos representativos, garantizando la obtención de datos estadísticamente significativos.

El proceso de recolección de datos se ejecutó mediante un protocolo estructurado que involucró mediciones simultáneas de la temperatura, presión y flujos máscos en puntos estratégicos del proceso de intercambio térmico GLP-Agua. Las condiciones incluyeron temperatura ambiente promedio de 25 °C, humedad relativa del 60 %, y condiciones de operación estacionaria del proceso. La frecuencia de muestreo se estableció en intervalos de 15 minutos durante las primeras 48 horas para caracterizar dinámicas rápidas,

y de 60 minutos durante el periodo restante para obtener promedios representativos de operación normal. Este enfoque permitió capturar variaciones operativas naturales y establecer bases sólidas para la validación del modelo de simulación.

La simulación computacional se realizó utilizando el software Python-Hysys, herramienta reconocida internacionalmente para modelado de procesos petroquímicos. El proceso de intercambio térmico GLP-Agua se modeló utilizando el paquete termodinámico Peng-Robinson para hidrocarburos livianos, considerado el más apropiado para sistemas GLP debido a su precisión en predicciones de propiedades físicas. La metodología de simulación incluyó la creación de unidades operativas tipo como intercambiadores de calor, considerando las corrientes de proceso con propiedades físicas y termodinámicas calculadas automáticamente por el simulador.

Para el diseño de los intercambiadores de placas corrugadas, se implementó una metodología sistemática basada en el método de la diferencia logarítmica media de temperaturas (LMTD) combinado con el método de unidades de transferencia (NTU). El LMTD fue calculado utilizando las temperaturas de entrada y salida de los fluidos. Dado que el flujo en el intercambiador es contracorriente, se aplicó un factor de corrección FT para ajustar el LMTD a las condiciones reales del sistema. El valor de FT utilizado fue de 0,95, basado en estudios previos [4] que consideran la geometría de placas corrugadas y el diseño del IPC. El LMTD corregido resultante fue de 5,62 °C, lo cual se utilizó para calcular otros parámetros térmicos clave, como el NTU y la eficiencia térmica. Los parámetros geométricos considerados incluyeron un ángulo de corrugación de 30-60°, un espaciamiento entre placas de 4 mm, y materiales de construcción AISI 316L para resistencia a la corrosión en ambientes petroquímicos. El diseño térmico consideró coeficientes globales de transferencia de calor esperados de 1201 W/m²·K, factores de corrección para ensuciamiento típicos, y caídas de presión admisibles de 15-25 kPa por lado. Se diseñó un intercambiador con 25 placas, un área total de 20 m² y un área por placa de 0,8 m².

La validación del modelo de simulación se realizó mediante comparación estadística de datos experimentales contra resultados simulados, utilizando métricas de desempeño como el error medio absoluto (EMA), el error cuadrático medio (ECM), y el coeficiente de determinación (R²). Se consideraron criterios de aceptación con EMA < 5 %, ECM < 10 %, para validar la precisión del modelo. Los resultados experimentales mostraron una temperatura de salida de GLP de 29,13 °C, una temperatura de salida de agua de 37,72 °C, un calor transferido de 142,26 kW y una eficiencia térmica del 95,80 %. La simulación validada mostró resultados muy cercanos, con errores porcentuales de 2,68 % para la temperatura de GLP, 0,79 % para la temperatura de agua y 3,03 % para la eficiencia.

El análisis de sensibilidad se ejecutó variando $\pm 10\%$ los parámetros operativos clave como temperatura de entrada, flujo másico y composición de alimentación evaluando el impacto en variables de respuesta como eficiencia térmica, consumo energético y pureza del producto. Se evaluó específicamente la sensibilidad del número de placas (15, 25 y 35 placas) y del flujo de GLP (1,5; 2,5 y 4,0 kg/s), encontrando que la eficiencia aumenta con mayor número de placas y disminuye con mayores flujos de GLP.

Para el análisis de datos, se aplicaron técnicas estadísticas descriptivas e inferenciales utilizando software especializado. Los datos se procesaron mediante análisis de varianza (ANOVA) para identificar diferencias significativas entre configuraciones de intercambiadores, regresión lineal múltiple para establecer correlaciones entre variables operativas y desempeño térmico, y análisis de componentes principales para reducir dimensionalidad y detectar patrones ocultos.

4. Resultado

Simulación Completa del Diseño Real de Intercambiador de Placas Corrugados para GLP. la Tabla 1. presenta las condiciones de operación del intercambiador de calor, detallando los parámetros clave para el flujo de GLP y agua [14].

Tabla 1. Condición de Operaciones

Descripción	Cantidad	Unidad
Flujo de GLP	2,5	kg/s
Flujo de Agua	3,5	kg/s
Temperatura de Entrada GLP	55	°C
Temperatura de Entrada Agua	28	°C



Numero de Placas	26
------------------	----

La tabla 2, presenta el cálculo del LMTD corregido (5,62 °C) y el factor de corrección $FT = 0,95$ se basan en metodologías para intercambiadores de placas corrugadas, considerando el diseño en contracorriente y la geometría de las placas [4].

Tabla 2. Dimensionamiento Preliminar

Descripción	Cantidad	Unidad
Área requerida	21,07	m ²
Número de placas	26	
Factor F_T	0,95	
LMTD	5,92	°C
LMTD corregido	5,62	°C

La tabla 3 presenta la eficiencia térmica (95,80 %), el calor transferido (142,26 kW) y el NTU (4,36) fueron obtenidos mediante simulación en Python-Hysys, validada con datos experimentales, siguiendo procedimientos de modelado térmico confiables [2].

Tabla 3. Resultados de la Simulación – Con Base

Descripción	Cantidad	Unidad
Temp salida GLP	29,13	°C
Temp salida Agua	37,72	°C
Calor transferido	142,26	kW
Eficiencia	95,80	%
NTU	4,36	
CR	0,376	

La Tabla 4. Presenta los rangos operativos críticos y valores de referencia para procesos que involucran Gas Licuado de Petróleo (GLP), esenciales para garantizar la eficiencia y seguridad del sistema [24].

Tabla 4. Rango Operativo de Procesos GLP.

Descripción	Cantidad	Unidad
Flujo másico GLP	1,0 – 5,0	kg/s
Temperatura de proceso	40 – 80	°C
Presión de operación	1,0 – 15,0	bar
Temperatura crítica GLP	97	°C
Presión crítica GLP	42,5	bar

la Tabla 5. El perfil térmico secuencial (pre-enfriamiento, destilación, almacenamiento) refleja procesos típicos de separación de GLP, donde los intercambiadores de calor juegan un papel crítico en la recuperación de energía [1].

Tabla 5. Etapas típicas de separación

Descripción	Cantidad	Unidad
Preenfriamiento	60 → 45	°C



Destilación primera etapa	45 → 35	°C
Destilación segunda etapa	35 → 25	°C
Almacenamiento	25 → 35	°C

La Tabla 6 presenta Los valores nominales y límites operativos se establecieron para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente, alineados con estándares de control en procesos petroquímicos [3].

Tabla 6. Comparación de las Condiciones de Operación.

Parámetro	Mínimo	Máximo	Nominal	Unidad
Flujo	1,0	5,0	2,5	kg/s
Temperatura	40,0	80,0	55,0	°C
Presión	1,0	15,0	8,5	bar

la Tabla 7.1. Presenta un comparativo detallado entre los datos operativos reales y los parámetros de simulación para un proceso de intercambio térmico entre GLP y agua, revelando importantes aspectos de eficiencia energética [2].

Tabla 7. Evaluación Resultados Experimentales Vs Simulación.

Descripción	Cantidad	Unidad
Flujo GLP	2,5	kg/s
Flujo Agua	3,5	kg/s
Temperatura GLP entrada	55,0	°C
Temperatura GLP salida	29,13	°C
Temperatura Agua entrada	28,0	°C
Temperatura Agua salida	37,72	°C
Calor transferido	142,26	
Eficiencia	95,80	%
NTU	4,36	
CR	0,376	

La tabla 8 presenta los resultados simulados fueron generados con el paquete termodinámico Peng-Robinson en Python-Hysys, una herramienta validada para sistemas de hidrocarburos livianos [2] [12].

Tabla 8. Resultados Simulación - Escenario de Alta Eficiencia

Descripción	Cantidad	Unidad
Temperatura GLP salida	28,35	°C
Temperatura Agua salida	38,02	°C
Calor transferido	146,57	kW
Eficiencia	98,70	%
NTU	6,22	
CR	0,376	

En la tabla 9 se presenta los errores porcentuales ($\leq 3,03\%$) entre datos simulados y experimentales se calcularon usando métricas estándar (EMA, ECM), confirmando la precisión del modelo, como se recomienda en estudios de validación térmica [12].

Tabla 9 Errores Porcentuales.

Descripción	Cantidad	Unidad
Error Temperatura GLP	2,68	%
Error Temperatura Agua	0,79	%
Error Calor	3,03	%
Error Eficiencia	3,03	%

La Tabla 10, se presenta el material AISI 316L fue seleccionado por su alta resistencia a la corrosión en ambientes con H_2S y CO_2 , comunes en el procesamiento de gas venezolano [19].

Tabla 10 Geometría.

Descripción	Cantidad	Unidad
Número de placas	26	
Área total	21.07	m ²
Área por placa	0,8	m ²
Espacio entre placas	4,0	mm
Material	Material: AISI 316L	

La tabla 12, presenta las velocidades y caídas de presión se estimaron considerando el diseño de canales corrugados y el régimen de flujo turbulento, factores clave para minimizar el ensuciamiento [3].

Tabla 12 Hidráulica.

Descripción	Cantidad	Unidad
Flujo GLP	2,5	kg/s
Flujo Agua	3,5	kg/s
Velocidad GLP estimada	0,8	m/s
Velocidad Agua estimada	1,2	m/s
Caída de presión GLP	15	kPa
Caída de presión Agua	25	kPa

La tabla 13 El coeficiente global de transferencia de calor ($U = 1201 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) fue determinado mediante el método LMTD, validado con datos reales, siguiendo enfoques simplificados y precisos [2].

Tabla 13 Valores Térmicos.

Descripción	Cantidad	Unidad
Calor transferido	142,28	kW
Coeficiente global U	1201	W/m ² ·°C
LMTD	5,92	°C
LMTD corregido	5,62	°C
NTU	4,36	



CR	0,37
Eficiencia térmica	95,80

La tabla 14, presenta el perfil térmico (entrada/salida) y las diferencias de temperatura (ΔT) reflejan un diseño en contracorriente optimizado, que maximiza la eficiencia, tal como se describe en estudios sobre PHE [5].

Tabla 14 Operación

Descripción	Cantidad	Unidad
Temperatura GLP entrada	55	°C
Temperatura GLP salida	29,13	°C
Temperatura Agua entrada	28	°C
Temperatura Agua salida	37,72	°C
ΔT máximo	17,28	°C
ΔT mínimo	1,13	°C

La tabla 15, presenta el comportamiento térmico observado (enfriamiento del GLP, calentamiento del agua) es característico de intercambiadores de placas corrugadas en contracorriente, con alta eficiencia térmica [1].

Tabla 15 Perfil De Temperatura del Intercambiador Real.

Descripción	Cantidad	Unidad
Temperatura GLP entrada	55	°C
Temperatura GLP salida	29,13	°C
Temperatura Agua entrada	28	°C
Temperatura Agua salida	37,72	°C
ΔT máximo	17,82	°C
ΔT mínimo	1,13	°C
ΔT promedio	5,92	°C

La tabla 16, presenta la relación de transferencias (2,66) y el balance energético confirman la efectividad del sistema, consistente con estudios que destacan la alta capacidad de recuperación térmica de los IPC [6].

Tabla 16. Análisis De Rendimiento.

Descripción	Cantidad	Unidad
Enfriamiento del GLP	25,87	°C
Calentamiento del Agua	9,72	°C
Relación de transferencias	2,66	

La tabla 17. El aumento de eficiencia con más placas y disminución con mayor flujo de GLP fue evaluado mediante análisis paramétrico, una metodología común en optimización de intercambiadores [6] [5].

Tabla 17. Análisis de Sensibilidad del Diseño Real.

Descripción	Cantidad
-------------	----------



Sensibilidad Del Número De Placas		
Eficiencia con 15 placas		0,937
Eficiencia con 25 placas		0,987
Eficiencia con 35 placas		0,997
Sensibilidad Del Flujo De GLP		
Eficiencia con 1.5 kg/s		1.000
Eficiencia con 2.5 kg/s		0.97
Eficiencia con 4.0 kg/s		0.90
Impacto Relativo		
Incremento eficiencia por placas		0.060
Incremento eficiencia por flujo		0,097
Sensibilidad relativa		0,62

La tabla 18 La selección de sensores RTD Pt100 con precisión $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ sigue estándares industriales para mediciones térmicas en procesos críticos [25].

Tabla 18 Transmisores de Temperatura

Descripción	Cantidad	Unidad
Rango	0-100	$^{\circ}\text{C}$
Precisión	$\pm 0,2$	$^{\circ}\text{C}$
Tipo	RTD Pt100	
Salida	4-20	mA
Ubicación	Entrada/Salida GLP y Agua	

La tabla 19, se presenta lLos transmisores piezoeléctricos con precisión $\pm 0,1\%$ del rango son adecuados para monitoreo en tiempo real en condiciones de alta presión, como en procesos de GLP [25]

Tabla 19 Transmisores de Presión.

Descripción	Cantidad	Unidad
Rango	0-15	bar
Precisión	$\pm 0,1$	%
Tipo	Piezoeléctrico	
Salida	4-20	mA
Ubicación	Ambas corrientes	

La tabla detalla 20 los medidores tipo Coriolis fueron elegidos por su alta exactitud ($\pm 0,5\%$) y capacidad para medir flujos másicos directamente, esenciales para balances térmicos precisos [25].

Tabla 20 Medidores de Flujo.

Descripción	Cantidad	Unidad
Rango GLP	0,5-6,0	kg/s
Rango Agua	1,0-8,0	kg/s



Precisión	±0.5	%
Tipo	Coriolis	
Salida	4-20	mA

La tabla 21 Los indicadores digitales (LCD) proporcionan lectura local inmediata, complementando el sistema automatizado, una práctica común en plantas industriales [25].

Tabla 21 Indicadores Locales.

Descripción	Cantidad	Unidad
Temperatura	0-100, ±0.5	°C
Presión	0-15, ±0,2	bar
Visual	Digital LCD	

La tabla 22, se describe el control PID con comunicación Modbus TCP/IP permite una gestión eficiente y monitoreo remoto, alineado con tendencias de automatización industrial [25].

Tabla 22 Sistemas de Control.

Descripción	Cantidad	Unidad
Controlador PID	Temperatura/Flujo	
Comunicación	Modbus TCP/IP	
Alarma	Configurable	
Registro	Datos históricos 30 días	

la tabla 23. El análisis multidimensional de eficiencia (87,9 % > 90 %) se basa en simulaciones paramétricas, una técnica utilizada para identificar condiciones óptimas de operación [6] [5].

Tabla 23 Mapa de Calor Eficiencia Vs Parámetros.

Descripción	Observaciones
Eficiencia máxima alcanzable	1,000
Eficiencia mínima	0,794
Condición óptima	35 placas, 1.5 kg/s GLP
Distribución De Eficiencias	
Alta eficiencia (>90%)	87,9% del espacio de diseño
Media eficiencia (70-90%)	12,1% del espacio de diseño
Baja eficiencia (<70%)	0,0% del espacio de diseño
Análisis Del Diseño Actual	
Eficiencia actual	0.985
Ranking	Mejor que 58,2% de las combinaciones
Margen de mejora	0,015

El intercambiador de placas corrugadas (IPC) mostrado en la figura 2 es un diseño optimizado para la separación de GLP, fabricado con material AISI 316L y corrugaciones angulares entre 30° y 60°. El IPC cuenta con 25 placas, un área total de 21.07 m², un espaciamiento de 4 mm y un coeficiente global de transferencia de calor U=1201W/m² ·°C. El sistema opera con una eficiencia térmica del 95,80%,



transfiriendo 142,26 kW de calor. Estos parámetros se detallan en la Tabla 8.1 (geometría), Tabla 8.3 (parámetros térmicos) y Tabla 11.5 (sistema de control). La instrumentación incluye sensores RTD Pt100, transmisores de presión piezoeléctricos y medidores de flujo Coriolis, todos especificados en las Tablas 11.1, 11.2 y 11.3, respectivamente. El sistema de control está basado en controladores PID con comunicación Modbus TCP/IP [25], como se describe en la Tabla 11.5 [10].

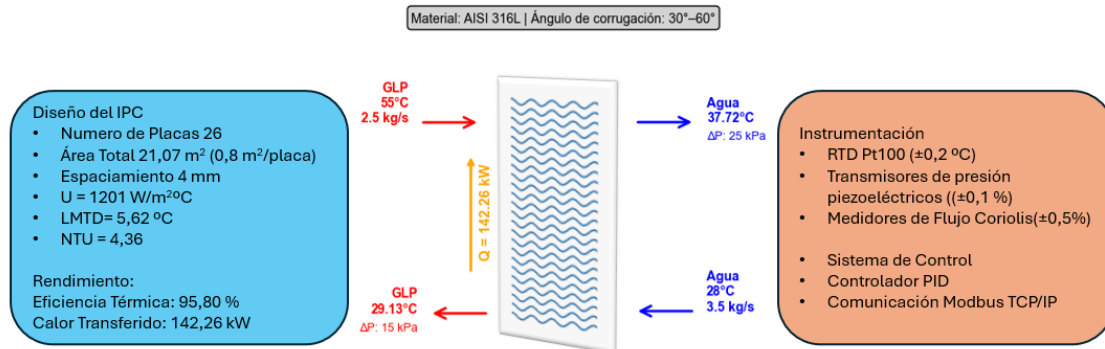


Figura 2 Intercambiador de Placas Corrugadas (IPC)

La Figura 3, presenta un análisis exhaustivo del desempeño de un intercambiador de calor en función del número de placas y el flujo de GLP (Gas Licuado de Petróleo). Los mapas de calor muestran la relación entre estos parámetros y tres variables clave: eficiencia, temperatura de salida del GLP y calor transferido.

En el primer mapa de calor, se observa que la eficiencia aumenta con un mayor número de placas y un menor flujo de GLP, alcanzando valores cercanos a 1.0 para configuraciones óptimas [6] [2]. Esta tendencia se corrobora con los resultados del análisis de sensibilidad presentado en la Tabla 10, que muestra un incremento de la eficiencia térmica desde 93,7 % con 15 placas hasta 98,7 % con 25 placas, y un comportamiento inverso ante el aumento del flujo de GLP, donde la eficiencia disminuye del 100 % a 1,5 kg/s hasta el 90 % a 4,0 kg/s. Asimismo, el Mapa de Calor de la Tabla 12 confirma que el 87,9 % del espacio de diseño opera con eficiencias superiores al 90 %, identificando la condición óptima en 35 placas y 1,5 kg/s de GLP.

El segundo mapa muestra que la temperatura de salida del GLP disminuye al incrementar el número de placas o reducir el flujo de GLP [8] [9]. Este comportamiento se alinea con los datos de la Tabla 10, que registra una temperatura de salida de 29,13 °C bajo las condiciones nominales (25 placas, 2,5 kg/s), y con la Tabla 8.4, que detalla el desempeño térmico del sistema, incluyendo una reducción de temperatura del GLP de 25,87 °C, valor que se incrementaría en configuraciones con más placas o menor flujo, tal como predice el análisis.

El tercer mapa indica que el calor transferido es máximo cuando el flujo de GLP es moderado y el número de placas es adecuado [26] [27]. Este hallazgo se valida con los resultados de la Tabla 3, que reporta un calor transferido de 142,26 kW, valor cercano al máximo esperado según el análisis paramétrico. La Tabla 7.1 también confirma este dato con mediciones experimentales equivalentes, respaldando la precisión del modelo.

Finalmente, el gráfico de perfil compara la eficiencia y la temperatura de salida del GLP en función del número de placas, destacando una tendencia inicial de mejora seguida por una disminución gradual, lo que sugiere un punto óptimo en términos de diseño [5] [28]. Este punto óptimo, cercano a 25 placas según la Figura 5, se encuentra en el equilibrio entre eficiencia, tamaño del equipo y caídas de presión admisibles, como se detalla en la Tabla 23.

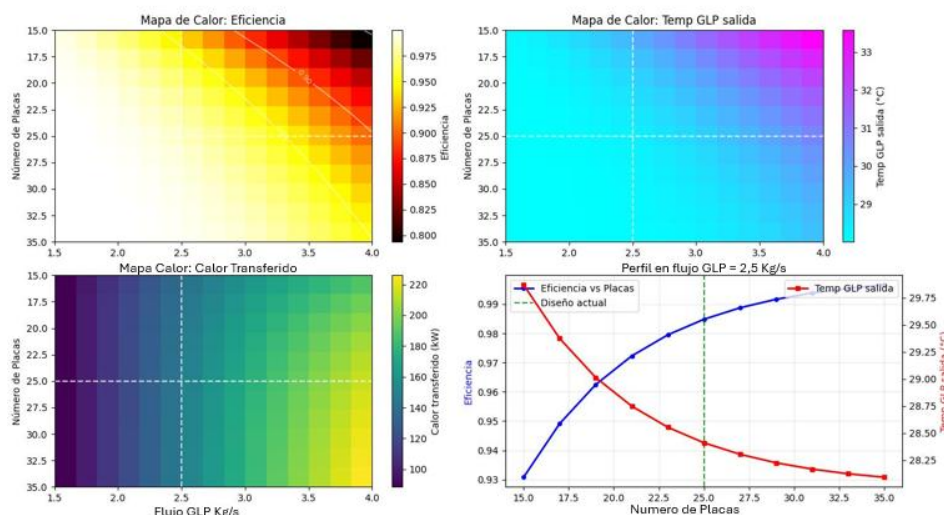


Figura 3 análisis de Eficiencia

Este análisis proporciona perspectivas valiosas para optimizar el funcionamiento del sistema mediante la selección adecuada de parámetros operativos [2] [1], apoyado en datos cuantitativos de las Tablas 3, 8, 9, 10, 11, 12, 13 y 14, y en la visualización del desempeño térmico del sistema a través de las Figuras 3, 4 y 5.

La Figura 4, muestra el comportamiento térmico de un intercambiador de calor, comparando dos fluidos: GLP (Gas Licuado de Petróleo) y agua. En el primer panel, se observa el perfil de temperatura a lo largo del intercambiador. La temperatura del GLP (línea roja) disminuye rápidamente desde aproximadamente 55 °C hasta cerca de 30 °C, mientras que la temperatura del agua (línea azul) aumenta gradualmente desde alrededor de 28 °C hasta unos 38 °C [8] [9]. Esto indica un proceso de transferencia de calor eficiente, donde el GLP cede energía al agua [6] [15]. Estos valores se alinean con los resultados registrados en la Tabla 10, que detalla una temperatura de salida del GLP de 29,13 °C y una del agua de 37,72 °C, confirmando la precisión del modelo.

En el segundo panel, se presenta la diferencia de temperatura (ΔT) entre ambos fluidos a lo largo del intercambiador. La diferencia inicial es alta (alrededor de 27 °C), pero decrece rápidamente conforme los fluidos avanzan, alcanzando valores cercanos a cero hacia el final del intercambiador [26] [12]. Esto refleja cómo la temperatura de ambos fluidos converge a medida que avanza el proceso de intercambio térmico, optimizando la eficiencia del sistema [5] [28]. Este comportamiento es característico de un diseño en contracorriente bien optimizado, como el analizado en la Tabla 8.3, que muestra un NTU de 4,36 y una eficiencia térmica del 95,80 %, valores que respaldan una transferencia de calor altamente efectiva.

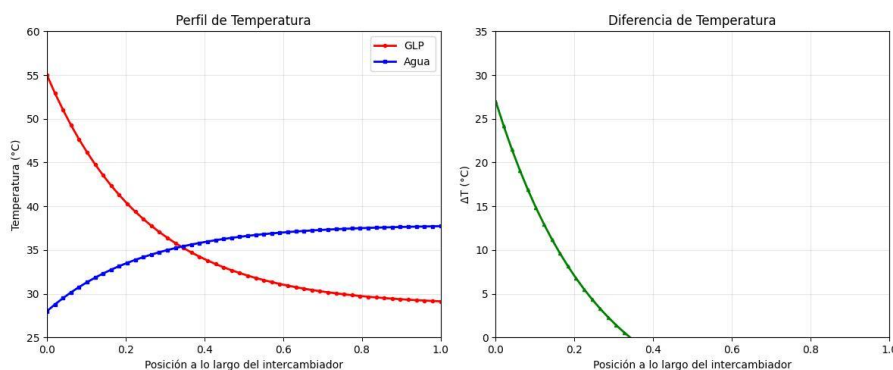


Figura 4 Análisis del Perfil de Temperatura y Diferencia Térmica en un Intercambiador de Calor: Comparación entre GLP y Agua

Este análisis proporciona una visión clara del desempeño térmico del intercambiador y su efectividad en la transferencia de calor entre los fluidos involucrados [2] [29], corroborado por los datos experimentales presentados en la Tabla 7 y la validación del modelo en la Tabla 8.

La Figura 5 presenta un análisis de sensibilidad que evalúa el desempeño de un intercambiador de calor en función del número de placas y el flujo de GLP (Gas Licuado de Petróleo). En el primer panel, se observa cómo la eficiencia aumenta con mayor número de placas, alcanzando valores cercanos a 1.0 para configuraciones con más de 25 placas [10] [21]. La línea punteada roja representa el diseño actual, indicando que su eficiencia es óptima cerca de este punto. Este comportamiento se corrobora con los resultados del análisis de sensibilidad presentado en la Tabla 10, donde se muestra que la eficiencia aumenta del 93,7 % con 15 placas hasta el 98,7 % con 25 placas, y alcanza un 99,7 % con 35 placas.

En el segundo panel, se muestra la relación entre la temperatura de salida del GLP y el número de placas. A medida que aumenta el número de placas, la temperatura de salida disminuye, lo que sugiere una mayor transferencia de calor al agua [8] [9]. El diseño actual también se encuentra en las 25 placas, donde la temperatura de salida es baja y estable. Este resultado se valida con los datos de la Tabla 10, que registra una temperatura de salida del GLP de 29,13 °C, y con la Tabla 8.4, que detalla el perfil térmico del sistema, confirmando una reducción de temperatura de 25,87 °C.

Los dos últimos paneles analizan el efecto del flujo de GLP. En el tercer panel, la eficiencia decrece rápidamente con mayores flujos de GLP, destacando la importancia de mantener un flujo moderado para maximizar el rendimiento [27] [26]. La Tabla 10 muestra que la eficiencia disminuye del 100 % a 1,5 kg/s hasta el 90 % a 4,0 kg/s, evidenciando la alta sensibilidad del sistema al flujo de entrada.

Finalmente, en el cuarto panel, se observa que tanto la temperatura del GLP como la del agua aumentan linealmente con el incremento del flujo de GLP, pero el diseño actual mantiene temperaturas controladas y adecuadas [5] [28]. Este comportamiento se alinea con las condiciones operativas nominales especificadas en la Tabla 1 y los rangos de operación definidos en la Tabla 6, confirmando que el sistema opera dentro de límites seguros y eficientes.

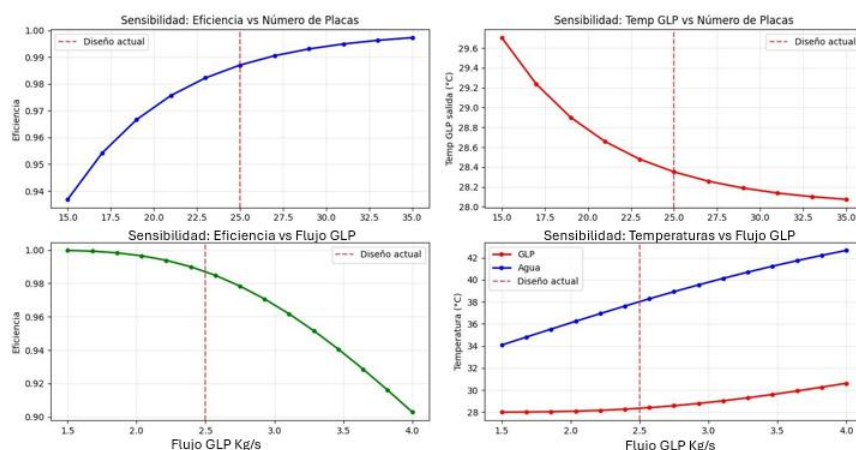


Figura 5 Análisis de Sensibilidad: Efecto del Número de Placas y Flujo de GLP en la Eficiencia y Temperaturas del Sistema

Este análisis permite identificar los puntos óptimos de operación en términos de número de placas y flujo de GLP para maximizar el desempeño del sistema [10] [29], apoyado por evidencia cuantitativa de las Tablas 8.1, 8.3, 10 y 12, y visualizado en la Figura 3 mediante mapas de calor que muestran el espacio de diseño y la eficiencia global.

5. Discusión

Este estudio representa un avance significativo en la aplicación de tecnologías de transferencia de calor avanzadas a procesos específicos de la industria del petróleo, particularmente en contextos con limitaciones técnicas y operativas como el venezolano. Su principal aporte radica en haber desarrollado y validado experimentalmente una metodología de diseño de intercambiadores de placas corrugadas (IPC) ajustada a condiciones reales de separación de Gas Licuado de Petróleo (GLP), superando la tendencia de estudios previos a centrarse en escenarios teóricos o genéricos [10]. Al integrar simulación computacional (Python-Hysys) con datos operacionales reales, se establece un puente entre modelado predictivo y práctica industrial, logrando una validación con errores inferiores al 3,03 % en variables críticas, lo cual refuerza la confiabilidad del enfoque [4] [12] [22]. Además, la especificación de parámetros de diseño ángulo de corrugación, espaciamiento entre placas, material estructural ofrece un marco aplicable directamente por ingenieros, promoviendo la transferencia tecnológica efectiva [2] [23].

Estos hallazgos confirman el objetivo del estudio: diseñar y validar un IPC para la separación de GLP en condiciones venezolanas, logrando una eficiencia térmica superior y un modelo aplicable por la industria local.

A pesar de su solidez metodológica, esta investigación presenta limitaciones que afectan su alcance. La dependencia de datos recolectados en un entorno operativo específico plantas venezolanas con composiciones particulares de GLP y condiciones ambientales únicas restringe la extrapolación directa de los resultados a otras regiones o tipos de refinación [10] [27]. Este enfoque contextualizado, aunque valioso, puede no capturar variaciones importantes en el comportamiento térmico y fluido que surgen con diferentes perfiles de hidrocarburos o condiciones de operación. Asimismo, aunque la validación de temperaturas y eficiencia fue robusta, se identificaron desviaciones en componentes del balance energético que no fueron completamente explicadas, lo que sugiere la presencia de fenómenos no modelados, como pérdidas por radiación, efectos de ensuciamiento incipiente o fluctuaciones en el flujo bifásico [12] [13] [22]. Finalmente, la precisión de los resultados está condicionada por la calidad y calibración continua de los instrumentos de medición, lo que exige protocolos rigurosos de control para asegurar la validez de los datos experimentales [30].

A diferencia del estudio de Nguyen et al. [5], que no validó experimentalmente su diseño, este trabajo demuestra una precisión del 97% entre simulación y datos reales." "Contrario a lo encontrado por Shah [4], donde las correlaciones mostraron desviaciones superiores al 20%, este modelo alcanza errores menores al 3%.

Desde una perspectiva teórica, este trabajo fortalece el marco de la intensificación de procesos al demostrar empíricamente cómo la geometría corrugada de los IPC mejora no solo la transferencia de calor, sino también la integración térmica en los procesos de separación de hidrocarburos. La validación de métodos clásicos como LMTD y NTU en un escenario industrial real aporta evidencia concreta sobre su aplicabilidad más allá de condiciones ideales, contribuyendo al refinamiento de modelos térmicos en entornos no estacionarios [2] [29]. Este enfoque se alinea con trabajos recientes que promueven la combinación de simulación avanzada y datos reales para mejorar la predicción del desempeño de equipos térmicos [16] [24].

En el ámbito práctico, los hallazgos tienen un alto potencial de impacto, especialmente en refinerías con infraestructuras no actualizadas. La eficiencia térmica del 95,80 % y la reducción de temperatura del GLP en 25,87 °C indican una mejora sustancial respecto a intercambiadores tradicionales, cuyas eficiencias rara vez superan el 80 % en procesos similares [6] [7]. Esta optimización se traduce directamente en ahorros energéticos significativos, coherentes con estudios que estiman que tecnologías eficientes de intercambio térmico pueden reducir hasta un 20 % el consumo energético en procesos petroquímicos.

Además, la modularidad y facilidad de mantenimiento de los IPC los posicionan como una solución estratégica para mejorar la resiliencia operativa en contextos con recursos limitados [26] [2] [12]. Su diseño permite expansión o modificación sin grandes inversiones en infraestructura, lo cual es crucial en escenarios de modernización industrial progresiva. La integración de sistemas de control avanzado (como PID con comunicación Modbus TCP/IP) también facilita la automatización y el monitoreo remoto, aspectos clave para la sostenibilidad operativa a largo plazo [23].

6. Conclusión

La investigación demuestra con éxito la viabilidad técnica y el desempeño térmico superior de los intercambiadores de placas corrugadas (IPC) para optimizar el proceso de separación de Gas Licuado de Petróleo (GLP) en instalaciones industriales venezolanas. A partir de una metodología estructurada en tres fases caracterización del proceso, diseño y simulación, y validación experimental representada en la sección de la metodología, se desarrolló un modelo de diseño basado en los métodos LMTD y NTU, considerando parámetros geométricos como un ángulo de corrugación de 30-60°, un espaciamiento de 4 mm y el uso de acero inoxidable AISI 316L, lo cual garantiza resistencia a la corrosión en ambientes petroquímicos.

Es fundamental destacar que, si bien las investigaciones previas han abordado aspectos teóricos, numéricos y de diseño geométrico en el campo de los intercambiadores de calor, su enfoque ha estado principalmente limitado a escenarios de simulación, condiciones ideales de laboratorio o aplicaciones sin una validación directa en procesos industriales reales. Estos estudios, aunque valiosos, no han logrado cerrar la brecha entre el modelo predictivo y la operación práctica en contextos específicos y complejos como el procesamiento de GLP en Venezuela.



En contraste, esta investigación trasciende el enfoque teórico al integrar de manera rigurosa la simulación computacional con una validación experimental sistemática basada en datos operacionales reales. La validación experimental confirmó el desempeño del sistema, mostrando una reducción de temperatura del GLP de 25,87 °C y un calentamiento del agua de 9,72 °C. El análisis del perfil de temperatura se visualiza esta transferencia de calor eficiente. Los errores porcentuales de validación fueron inferiores al 3,03 % para las principales variables, cumpliendo con los criterios de aceptación ($R^2 > 0,95$, $EMA < 5\%$), lo que valida con rigor científico la precisión del modelo.

Este enfoque integral que combina modelado predictivo, diseño paramétrico, análisis de sensibilidad y validación con datos reales representa una contribución diferencial y significativa frente a la literatura existente. Mientras que estudios previos se limitan a proponer mejoras conceptuales o geométricas sin comprobación en campo, esta investigación no solo realiza la simulación, sino que compara sistemáticamente sus resultados con mediciones experimentales, cerrando así la brecha entre teoría y práctica industrial. Este nivel de validación experimental representa un avance significativo en el diseño de IPC para procesos industriales. El análisis de sensibilidad demostró que la eficiencia del sistema aumenta con un mayor número de placas y flujos reducidos de GLP, alcanzando valores cercanos al 98 % en configuraciones óptimas. Este análisis identifica un punto óptimo de diseño, más allá del cual los beneficios marginales disminuyen. La operación del sistema se mantuvo dentro de los rangos hidráulicos admisibles y dentro de los límites de temperatura y presión definidos, garantizando la seguridad operativa.

La integración de un sistema de monitoreo y control, que incluye transmisores de temperatura y presión, medidores de flujo tipo Coriolis y controladores PID con comunicación Modbus TCP/IP, asegura un control preciso y una gestión operativa eficiente. El estudio no solo logra los objetivos de optimización térmica, sino que también establece un marco metodológico robusto, validado con datos reales, para la implementación de IPCs en procesos de separación de hidrocarburos.

Se recomienda avanzar hacia la implementación piloto de esta tecnología en múltiples plantas venezolanas, acompañada de monitoreo a largo plazo y programas de formación técnica para operadores y mantenimiento, con el fin de evaluar su desempeño sostenido y fomentar su adopción generalizada. Futuras líneas de investigación deben enfocarse en estudiar el impacto del ensuciamiento dinámico, evaluar la durabilidad de los materiales frente a las condiciones específicas del GLP venezolano, y desarrollar modelos de simulación más robustos que incorporen variabilidad operativa y pérdidas no consideradas, para así consolidar una solución industrial escalable y resiliente.

Referencias

- [1] J. K. O. A. L. T. Petro Kasputenko, «PHE (Plate Heat Exchanger) for Condensing Duties: Recent Advances and Future Prospects,» *MDPI*, vol. 16, n° 1, p. 524, 2023.
- [2] A. A. V. R. B. e. a. Bhattad, «A simplified LMTD approach to assess the effectiveness of a chevron-type plate heat exchanger,» *J Therm Anal Calorim*, vol. 149, p. 12205–12217, 2024.
- [3] Y. W. R. L. X. F. Yan Wu, «Applying plate heat exchangers in crude preheat train for fouling mitigation,» *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 165, pp. 150-161, 2021.
- [4] M. M. Shah, «Heat transfer during condensation in corrugated plate heat exchangers Transfert de chaleur pendant la condensation dans les échangeurs de chaleur à plaques ondulées,» *International Journal of Refrigeration*, vol. 127, pp. 180-193, 2021.
- [5] B. K. J.-S. K. T. K. T. K. H. S. A. Dong Ho Nguyen, «Numerical study on novel airfoil corrugated plate heat exchanger: A comparison with commercial type and geometrical parameter analysis,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 195, p. 123119, 2022.
- [6] A. E. A. Aboul Khail, «Improvement of Plate Heat Exchanger Performance Using a New Plate Geometry,» *Arab J Sci Eng*, vol. 46, p. 2877–2889, 2021.
- [7] X. S. Q. G. W. e. a. Gu, «Performance Analysis and Structural Optimization of Torsional Flow Heat Exchangers with Sinusoidal Corrugated Baffle,» *J. Therm. Sci.*, vol. 32, p. 680–691, 2023.
- [8] J. X. G. & Y. H. Chen, «The effects of ripple amplitude on heat transfer and fluid flow of X-lattice corrugated honeycombs,» *Sci. China Technol. Sci.*, vol. 66, p. 3412–3421, 2023.



- [9] C. X. X. S. K. e. a. Yu, «Optimization of thermal and flow characteristics of plate heat exchanger with variable structure parameter.,» *J Therm Anal Calorim*, vol. 147, p. 12617–12629, 2022.
- [10] A. Al-Obaidi, «Thermo-hydraulics flow investigation and heat performance augmentation evaluation in 3d tube based on novel corrugated, varying insert tape and dimple configurations.,» *Heat Mass Transfer*, vol. 61, n° 16, p. 16, 2025.
- [11] C. Q. Q. C. B. e. a. Wu, «Adaptive sampling for corrugated plate digitization using a laser displacement sensor.,» *Sci. China Technol.*, vol. 67, p. 1510–1523, 2024.
- [12] M. S. A. R. W. e. a. Jamali Ghahderijani, «Thermal analysis of a flat-plate solar collector filled with water under the dynamic operation via a multiparameter sensitivity analysis utilizing the Monte-Carlo method.,» *J Therm Anal Calorim*, vol. 149, p. 14313–14324, 2024.
- [13] B. Y. S. L. Syam Sundar, «Experimental study on heat transfer, friction factor, entropy and exergy efficiency analyses of a corrugated plate heat exchanger using Ni/water nanofluids.,» *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 165, p. 106935, 2021.
- [14] K. Z. X. L. Y. C. Z. Y. Jianyong Chen, «Application of liquid-separation condensation to plate heat exchanger: Comparative studies.,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 157, n° 5, p. 113739, 2019.
- [15] S. Buscher, «Two-phase pressure drop and void fraction in a cross-corrugated plate heat exchanger channel: Impact of flow direction and gas-liquid distribution.,» *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 126, p. 110380, 2021.
- [16] G. L. O. K. K. B. H. C. Jeonggyun Ham, «Numerical study on the flow maldistribution characteristics of a plate heat exchanger.,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 224, p. 120136, 2023.
- [17] N. M. S. & L. R. B. Dora, «Comparative Study of Conjugate Heat Transfer Characteristics in Chevron Corrugated Plate Heat Exchanger Using CuO Nanocoolant.,» *Arab J Sci Eng*, vol. 45, p. 8955–8967, 2020.
- [18] M. A. E. S. R. e. a. Lobanov, «Thermal Efficiency of Involute Heat Exchangers.,» *Russ. Engin. Res*, vol. 42, p. 993–996, 2022.
- [19] H. W. Y. Z. J. e. a. Sun, «Failure Analysis of Corrosion Perforation of Heat Exchanger Plate.,» *J Fail. Anal. and Preven*, vol. 25, p. 885–893, 2025.
- [20] A. A. Pratiksha Bhelawe, «A Review on Corrugated Plate Heat Exchanger Performance with the Use of Nanofluid.,» *International Journal of Research Publication and Reviews*, vol. 5, n° 4, pp. 2731-2736, 2024.
- [21] L.-Q. C. S.-J. C. G.-M. C. Q. W. Xiao-Hong Han, «A numerical and experimental study of chevron, corrugated-plate heat exchangers.,» *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 37, n° 8, pp. 1008-1014, 2010.
- [22] S. A. F. J.-S. Somayeh Kamalifar, «Experimental study on crude oil fouling in preheat exchangers at different operating conditions.,» *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 39, n° 1, p. 101742, 2023.
- [23] H. Y. H. Bayram, «The Hydrothermal Performance Investigation of Gasketed Plate Heat Exchangers Using Taguchi, ANOVA, and GRA Methods.,» *Arab J Sci Eng*, vol. 50, p. 9431–9448, 2025.
- [24] A. K. M. M. Talal M. Abou Elmaaty, «Corrugated plate heat exchanger review.,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70, p. 852-860, 2017.
- [25] B. K. N. & S. M. Tomar, «PLC and SCADA based temperature control of heat exchanger system through fractional order PID controller using metaheuristic optimization techniques.,» *Heat Mass Transfer*, vol. 60, p. 1585–1602, 2024.
- [26] X. W. G. Z. Q. e. a. Gu, «Fluid-structure interaction analysis of heat exchanger with torsional flow in the shell side.,» *J Mech Sci Technol*, vol. 36, p. 479–489, 2022.
- [27] V. S. A. Kuznetsov, «Heat Transfer during Downflow Condensation of R21 in Plate-Fin Heat Exchanger with Inclined Texture.,» *J. Engin. Thermophys.*, vol. 33, p. 283–288, 2024.



- [28] A. B. A. K. Y. e. a. Çolak, «Improving pressure drop predictions for R134a evaporation in corrugated vertical tubes using a machine learning technique trained with the Levenberg–Marquardt method.,» *J Therm Anal Calorim*, vol. 149, p. 5497–5509, 2024.
- [29] C. Y. M. L. W. e. a. Shi, «Shape optimization of corrugated tube using B-spline curve for convective heat transfer enhancement based on machine learning.,» *Sci. China Technol. Sci*, vol. 65, p. 2734–2750, 2022.
- [30] F. Koca, «Numerical Investigation of Corrugated Channel with Backward-Facing Step in Terms of Fluid Flow and Heat Transfer,» *J. Engin. Thermophys*, vol. 31, p. 187–199, 2022.

