

Type of Article (Original article)

Modelado Térmico y Simulación Computacional de Torres de Enfriamiento para la Separación de Hidrocarburos Ligeros Aplicación en la Destilación de GLP

Thermal Modeling and Computational Simulation of Cooling Towers for the Separation of Light Hydrocarbons Application in LPG Distillation

Kelvin Cabrera^{1*}, Alex Delgado²

¹UNEFA, Valencia, Venezuela

²Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

corresponding Author: kjrcabrera@gmail.com

Received: 31 July 2025

Revised: 6 August 2025

Accepted: 9 August 2025

Published: 30 August 2025

Inf. del art.

Resumen

Palabras Clave

Condensación,
Destilación,
GLP,
Refinería,
Torres de
enfriamiento

Background: Las torres de enfriamiento son componentes críticos en procesos industriales de separación de hidrocarburos ligeros, como la destilación de gas licuado de petróleo (GLP), donde su eficiencia térmica influye directamente en la efectividad de la condensación de propano y butano.

Objetivo: El objetivo de este estudio es desarrollar un modelo térmico y de simulación computacional validado para evaluar y comparar el desempeño de cuatro configuraciones de torres de enfriamiento tiro natural, tiro inducido, flujo cruzado y torre híbrida (dry-wet) en una planta de destilación de GLP, considerando eficiencia térmica, consumo energético, pérdidas de agua y costo operativo.

Método: Se implementó un enfoque analítico-computacional basado en modelos matemáticos y simulaciones en Python (v3.10), utilizando las bibliotecas NumPy y SciPy. Las simulaciones consideraron una carga térmica de 4861,11 kW, caudal de agua de 279 m³/h y condiciones ambientales constantes (25°C, 60 % de humedad relativa). El modelo fue validado mediante la ecuación de Merkel, el método NTU, conservación de masa y energía, y coherencia con tendencias de la literatura.

Resultados: Los sistemas de tiro natural e inducido alcanzaron la mayor eficiencia térmica (71,43%), mientras que el flujo cruzado y la torre híbrida obtuvieron 60 % y 55,72%, respectivamente. El tiro natural presentó el menor costo operativo anual (20.497 USD/año) debido a su nulo consumo energético, a pesar de su elevada huella de terreno. La torre híbrida redujo las pérdidas de agua en un 37 % respecto al tiro inducido, aunque con un mayor costo energético.

Conclusiones: El modelo desarrollado permite una evaluación integral para la selección de tecnologías de enfriamiento, demostrando que el tiro natural es la opción más eficiente y económica en términos operativos, mientras que las torres híbridas ofrecen ventajas hídras en contextos de escasez. Estos resultados apoyan una toma de decisiones técnica, económica y ambientalmente sostenible en la industria petroquímica.

Article info

Abstract

Background: Cooling towers are critical components in industrial light hydrocarbon separation processes, such as liquefied petroleum gas (LPG) distillation, where their thermal efficiency directly influences the effectiveness of propane and butane condensation.



Key words:
Condensation,
Distillation,
LPG,
Refinery,
Cooling Towers

Objective: The objective of this study is to develop a validated thermal and computational simulation model to evaluate and compare the performance of four configurations of natural draft, induced draft, crossflow and dry-wet cooling towers in an LPG distillation plant, considering thermal efficiency, energy consumption, water losses and operating cost.

Method: An analytical-computational approach based on mathematical models and simulations in Python (v3.10) was implemented, using the NumPy and SciPy libraries. The simulations considered a thermal load of 4861.11 kW, water flow rate of 279 m³/h and constant environmental conditions (25°C, 60 % relative humidity). The model was validated using the Merkel equation, the NTU method, conservation of mass and energy, and consistency with literature trends.

Results: The natural and induced draft systems achieved the highest thermal efficiency (71.43%), while the crossflow and hybrid tower obtained 60% and 55.72%, respectively. The natural draft presented the lowest annual operating cost (20,497 USD/year) due to its zero-energy consumption, despite its high land footprint. The hybrid tower reduced water losses by 37 % with respect to the induced draft, although with a higher energy cost.

Conclusions: The developed model allows a comprehensive evaluation for the selection of cooling technologies, demonstrating that natural draft is the most efficient and economical option in operational terms, while hybrid towers offer water advantages in shortage contexts. These results support technical, economically and environmentally sustainable decision making in the petrochemical industry.

1. Introducción

Las torres de enfriamiento son componentes críticos en los procesos industriales de separación de hidrocarburos ligeros, especialmente en la destilación de gas licuado de petróleo (GLP), donde su función principal es disipar el calor residual generado durante la condensación de propano y butano. La eficiencia de estas unidades influye directamente en la efectividad del fraccionamiento, el consumo energético, la demanda hídrica y la sostenibilidad operativa de las plantas petroquímicas. En este contexto, la selección adecuada de la tecnología de torre de enfriamiento ya sea de tiro natural, tiro inducido, flujo cruzado o diseño híbrido (dry-wet) se convierte en un desafío técnico, económico y ambiental que requiere un análisis integral basado en múltiples criterios de desempeño. A pesar de su relevancia, persiste una brecha significativa en la literatura científica respecto a estudios comparativos cuantitativos que evalúen de manera simultánea la eficiencia térmica, el consumo energético, las pérdidas de agua y el costo operativo de estas tecnologías aplicadas específicamente a procesos de destilación de GLP.

La investigación previa sobre torres de enfriamiento ha abordado diversos aspectos del rendimiento térmico e hidráulico de estas instalaciones. Estudios como el de Araujo [1] han combinado simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) con análisis experimentales para evaluar empaques alternativos, demostrando que la geometría del relleno influye directamente en la superficie de contacto aire-agua y, por ende, en la efectividad del enfriamiento. Asimismo, Laptev [2] [3] han desarrollado modelos matemáticos para calcular los coeficientes de transferencia de calor y masa en torres de película, proponiendo métodos para optimizar el rendimiento térmico mediante el uso de empaques intensificados. Estos modelos, validados experimentalmente, ofrecen una base sólida para la simulación de torres contracorriente, aunque no siempre se extienden a configuraciones híbridas o de tiro natural, que presentan dinámicas más complejas [4] [5].

Otro aspecto fundamental es la influencia de las condiciones ambientales en el desempeño de las torres [6]. Investigaciones de Yang [7] han analizado el impacto del viento, la humedad relativa y las temperaturas extremas en torres de fuente de calor, mostrando que ambientes con alta humedad y baja temperatura de bulbo húmedo reducen significativamente la capacidad de enfriamiento, con disminuciones de hasta un 15 % en la eficiencia térmica. Estos hallazgos subrayan la importancia de considerar el clima local en el diseño de torres, especialmente en regiones tropicales o costeras donde las condiciones pueden ser adversas para la transferencia de calor evaporativa.

En el ámbito de las torres híbridas (dry-wet), la investigación ha destacado su potencial para reducir el consumo de agua. Madyshev [8] han estudiado los bloques secos de torres híbridas, demostrando que su integración con secciones húmedas permite un control más eficiente de las pérdidas por evaporación. Este enfoque es especialmente relevante en áreas con escasez hídrica, donde el ahorro de agua puede compensar parcialmente el mayor consumo energético asociado a los ventiladores [9] [10]. Además, estudios como el de Laptev [3] han desarrollado modelos matemáticos que consideran la no uniformidad en la distribución del agua y del aire, lo que mejora la precisión de las simulaciones y permite una mejor predicción del rendimiento real en condiciones operativas no ideales.



A pesar de estos avances, existe una escasez notable de estudios que realicen una comparación cuantitativa y multicriterio entre diferentes tecnologías de torres de enfriamiento aplicadas específicamente al fraccionamiento de GLP. La mayoría de las investigaciones se enfocan en el modelado térmico de una sola configuración o en aspectos aislados del sistema, como el rendimiento del relleno o el consumo energético, sin integrar variables económicas, ambientales y operativas en un marco común [11] [12]. Esta limitación dificulta la toma de decisiones en contextos industriales, donde la selección de la tecnología debe basarse en un equilibrio entre eficiencia, sostenibilidad y rentabilidad.

Frente a esta necesidad, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Qué configuración de torre de enfriamiento tiro natural, tiro inducido, flujo cruzado o híbrida (dry-wet) ofrece el mejor desempeño térmico, económico e hídrico para la destilación de GLP bajo condiciones operativas realistas?

En este contexto, el presente trabajo busca llenar esta brecha mediante el desarrollo y validación de un modelo computacional que permita comparar cuatro configuraciones tecnológicas: tiro natural, tiro inducido, flujo cruzado y torre híbrida (dry-wet) [13], bajo condiciones operativas realistas en una planta de destilación de GLP. A diferencia de estudios previos, esta investigación no solo evalúa el desempeño térmico, sino que también incorpora el costo operativo anual, las pérdidas de agua, el consumo energético y la huella de terreno, ofreciendo una herramienta integral para la selección de tecnologías en la industria petroquímica. El modelo, implementado en Python (v3.10) utilizando las bibliotecas NumPy y SciPy, se basa en principios de conservación de masa y energía, la ecuación de Merkel y el método NTU, garantizando su validez termodinámica y coherencia con la literatura científica.

El objetivo específico de este estudio es desarrollar un modelo térmico y de simulación computacional validado para evaluar y comparar el desempeño de las cuatro configuraciones de torres de enfriamiento en una planta con una carga térmica de 4861,11 kW, caudal de agua de 279 m³/h y condiciones ambientales constantes (25 °C, 60 % de humedad relativa). La metodología incluye la caracterización del proceso, el modelado matemático detallado para cada tecnología, la simulación computacional y un análisis comparativo multicriterio que permite identificar la opción más adecuada según diferentes escenarios operativos y de sostenibilidad [14] [15]. Los resultados esperados no solo contribuyen al conocimiento técnico sobre el comportamiento de estas unidades, sino que también apoyan una toma de decisiones eficiente y alineada con los principios de ingeniería [14].

2. Revisión de Literatura

La investigación sobre torres de enfriamiento ha evolucionado hacia modelos termodinámicos avanzados y simulaciones computacionales que integran eficiencia térmica, consumo energético y sostenibilidad hídrica. Esta revisión analiza cuatro ejes clave: (1) fundamentos de transferencia de calor y masa, (2) comportamiento hidrodinámico por configuración, (3) eficiencia energética y hídrica, y (4) tendencias en optimización multicriterio.

El modelo de Merkel y el método del Número de Unidades de Transferencia (NTU) son los pilares del análisis térmico en torres de enfriamiento [1] [16]. Ambos permiten predecir la eficiencia basada en la entalpía del aire húmedo y la temperatura del agua, sin requerir coeficientes de transferencia de masa independientes [2] [3]. Estos modelos han sido validados en torres contracorriente, especialmente con rellenos intensificados [5], aunque su aplicación a flujos no uniformes requiere ajustes. Lapteva [4] demostraron que la distribución irregular del agua y el aire puede reducir la eficiencia hasta en un 12 %, lo que justifica simulaciones detalladas como la del presente estudio.

En cuanto a la configuración, las torres de tiro natural aprovechan la convección térmica, eliminando el consumo energético de ventiladores [15]. Sin embargo, su eficiencia depende fuertemente de la humedad relativa y la temperatura de bulbo húmedo, con reducciones de hasta un 15 % en ambientes cálidos y húmedos [7]. Las de tiro inducido ofrecen mayor control operativo mediante ventiladores, alcanzando eficiencias superiores al 70 % [1] [17], aunque con un alto consumo energético (hasta 60 kW por ventilador) [11]. Las de flujo cruzado simplifican el diseño, pero su eficiencia es menor (60 %) debido a un contacto subóptimo entre fluidos y mayores pérdidas por drift [12] [17].

Las torres híbridas (dry-wet) combinan enfriamiento por evaporación y convección forzada, reduciendo las pérdidas de agua hasta en un 50 % [8] [9]. Aunque son ideales en zonas con escasez hídrica, su sección seca consume más energía y disminuye la eficiencia térmica global. Dmitriev [18] destacan que su rendimiento depende del balance térmico entre ambas secciones, lo que exige control avanzado.

Desde el punto de vista operativo, existe un trade-off entre energía y agua: las torres húmedas son eficientes térmicamente, pero consumen más agua, mientras que las híbridas ahorran agua a costa de mayor



consumo energético [10]. Este equilibrio es crítico en procesos de alta carga térmica, como la destilación de GLP, donde el costo operativo depende de ambos recursos.

Pese a los avances en modelado y CFD [1] [19], persiste una carencia de estudios que comparen múltiples tecnologías bajo un marco multicriterio (térmico, energético, hídrico, económico y espacial) en procesos petroquímicos específicos. La mayoría se centra en una sola variable o tecnología, limitando su aplicabilidad industrial [11] [12].

Este vacío justifica el presente trabajo, que no solo simula el desempeño de cuatro tecnologías, sino que las compara bajo condiciones estandarizadas, integrando criterios que tradicionalmente se analizan por separado. El estudio se posiciona del área de ingeniería de procesos, aportando una herramienta para la toma de decisiones sostenible en la industria de Petroquímica.

3. Metodología

El presente estudio adopta un enfoque analítico y computacional para evaluar y comparar el desempeño de cuatro configuraciones tecnológicas de torres de enfriamiento tiro natural, tiro inducido, flujo cruzado y torre híbrida (dry-wet) en el contexto de una planta de destilación de gas licuado de petróleo (GLP). La metodología se estructura en tres fases claramente definidas: caracterización del proceso, modelado matemático y simulación computacional, y análisis comparativo multicriterio. El diseño del estudio no es experimental, es de tipo simulado, con un enfoque cuantitativo que permite la evaluación técnica, económica y ambiental de las diferentes tecnologías bajo condiciones operativas estandarizadas, garantizando así una comparación objetiva y reproducible.

En la primera fase, se realizó la caracterización del proceso, estableciendo los parámetros operativos basados en condiciones típicas de plantas industriales de fraccionamiento de GLP. Se consideró una carga térmica a disipar de 4861,11 kW (4.86 MW), un caudal de agua de enfriamiento de 279 m³/h (0,0775 m³/s), una temperatura de entrada del agua de 40 °C y una temperatura de salida de 25 °C, lo que define un rango de enfriamiento (ΔT) de 15 °C. Las condiciones ambientales se fijaron en una temperatura ambiente de 25 °C, una humedad relativa del 60 % y una temperatura de bulbo húmedo estimada de 19 °C. Estos parámetros se mantuvieron constantes en todas las simulaciones para asegurar la comparabilidad entre las tecnologías evaluadas.

La segunda fase consistió en el desarrollo del modelado matemático y la simulación computacional para cada configuración de torre. Los modelos se basaron en principios termodinámicos fundamentales, incluyendo la conservación de masa y energía, la ecuación de Merkel y el método del Número de Unidades de Transferencia (NTU), ampliamente utilizados en la ingeniería de torres de enfriamiento. Las simulaciones se implementaron utilizando el lenguaje de programación Python (versión 3.10), con las bibliotecas NumPy y SciPy para el cálculo numérico y la resolución de ecuaciones diferenciales. Para cada tecnología, se desarrollaron modelos específicos: para el tiro natural, se calculó la presión de tiro por convección natural, la velocidad del aire y el caudal másico; para el tiro inducido, se modeló el sistema de ventilación, el consumo energético y las pérdidas de presión; para el flujo cruzado, se evaluó la eficiencia térmica bajo un flujo perpendicular del aire; y para la torre híbrida, se desarrolló un modelo integrado que considera una disipación parcial de la carga térmica (2430,55 kW) en la sección húmeda por evaporación y el resto en la sección seca por convección forzada.

La validación del modelo se realizó mediante tres criterios principales: comparación con teorías estándar como la ecuación de Merkel y el método NTU; verificación de la conservación de masa y energía en todos los casos simulados; y coherencia de los resultados con tendencias reportadas en la literatura científica. En la tercera fase, se llevó a cabo un análisis comparativo multicriterio que evaluó cada tecnología según múltiples indicadores: eficiencia térmica (%), consumo energético diario (kWh/día), pérdidas de agua (m³/h), costo operativo anual (USD/año), huella de terreno, inversión inicial estimada (CAPEX) y requerimientos de mantenimiento. Los costos operativos se calcularon considerando un precio de energía de \$0,10/kWh y un costo de agua de \$0,30/m³. Esta metodología integral permite no solo predecir el desempeño térmico [20], sino también apoyar decisiones técnicas, económicas y ambientalmente sostenibles en la selección de tecnologías para la industria petroquímica.

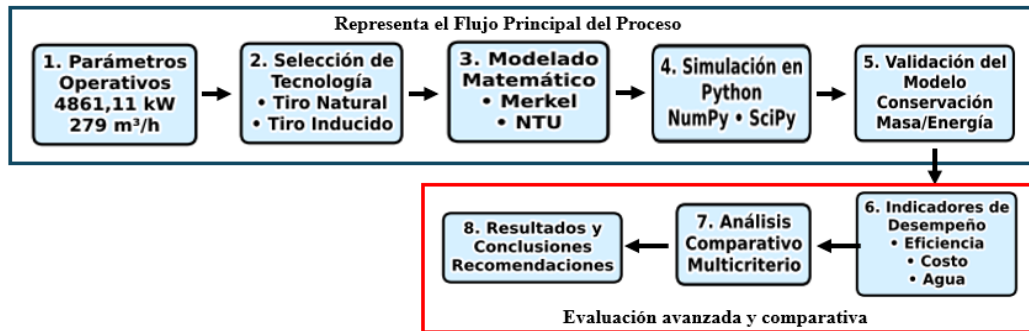


Figura 1 Diagrama de Flujo de Datos

3.1 Análisis del Diagrama de Flujo de Datos.

Este estudio evaluó el desempeño de diferentes tipos de torres de enfriamiento en una planta de destilación de GLP. Se comenzó definiendo las condiciones de operación, como una carga térmica de 4861,11 kW y un caudal de agua de 279 m³/h (Tabla 1). Luego, se seleccionaron tecnologías como torres de tiro natural e inducido para compararlas. Se desarrolló un modelo matemático basado en principios termodinámicos (como la ecuación de Merkel y el método NTU), que fue simulado en Python usando herramientas científicas (NumPy, SciPy). El modelo se validó con leyes de conservación de masa y energía, y con tendencias de la literatura [1] [2]. Después, se analizaron indicadores clave como eficiencia térmica (Tabla 5; Figura 2), consumo de agua (Figura 3), energía (Tabla 2.1, Tabla 3) y costos (Figura 4). Finalmente, se realizó una comparación integral (Tabla 6; Figura 10) para determinar la mejor opción según criterios técnicos, económicos y ambientales, concluyendo con recomendaciones para una selección eficiente y sostenible de la tecnología más adecuada.

4. Resultados

Los resultados de la simulación muestran una clara jerarquía en el desempeño térmico de las tecnologías evaluadas, con diferencias significativas en eficiencia, consumo energético, pérdidas hídricas y costo operativo. La eficiencia térmica, calculada mediante el método NTU y validada con la ecuación de Merkel, refleja la capacidad de cada torre para aprovechar el potencial termodinámico del aire ambiente, especialmente su temperatura de bulbo húmedo (19 °C en este estudio) [1] [2]. La diferencia de entalpía entre el aire de entrada y salida es un indicador clave: sistemas con mayor contacto aire-agua y mejor distribución del flujo presentan mayores incrementos en la entalpía del aire, lo que implica una mayor transferencia de calor latente [4].

La torre de tiro natural y la de tiro inducido alcanzan la máxima eficiencia térmica (71,43 %), lo cual se atribuye a su diseño de flujo contracorriente, que maximiza el potencial de transferencia de calor y masa al mantener un gradiente termodinámico favorable a lo largo de toda la columna [18] [13]. Este diseño permite que el aire, inicialmente seco (HR = 60 %), se acerque a la saturación térmica al final del proceso, absorbiendo significativa cantidad de calor latente. En contraste, el flujo cruzado (60 %) y la torre híbrida (55,72 %) presentan menores eficiencias debido a una menor superficie efectiva de contacto y una distribución no uniforme del aire, lo que limita la capacidad de saturación del aire y, por tanto, la evaporación del agua [17] [18] [21].

En términos hídricos, la torre híbrida destaca por reducir las pérdidas por evaporación en un 50 % respecto a las torres convencionales, al disipar solo la mitad de la carga térmica mediante enfriamiento evaporativo [9] [10]. Este ahorro es crítico en regiones con escasez de agua, aunque se compensa con un mayor consumo energético en la sección seca [9]. El flujo cruzado registra las mayores pérdidas totales de agua (9,12 m³/h), resultado de una alta tasa de evaporación y drift, posiblemente por deficiencias en los eliminadores de niebla o en la distribución del aire [12] [22].

Desde el punto de vista económico, el tiro natural presenta el menor costo operativo anual (\$20.497,35), gracias a su nulo consumo energético, a pesar de su elevada huella de terreno [11]. En contraste, el flujo cruzado y la torre híbrida presentan costos operativos elevados (\$102.795,42 y \$100.310,92/año), impulsados principalmente por su alto consumo energético (2160 y 2400 kWh/día, respectivamente) [20]. Estos resultados se resumen en la Tabla 5 y se ilustran gráficamente en la Figura 2 y la Figura 4, que muestran la relación entre eficiencia térmica, consumo de recursos y costos operativos.

Se simularon diferentes tipos de torres de enfriamiento bajo condiciones ambientales constantes:

Tabla 1. Parámetros generales

Parámetros	Valor	Unidad
Carga térmica a disipar (Q)	4861,11	kW
Caudal de agua de enfriamiento (m ³ /h)	279	m ³ /h
Temperatura de entrada del agua (Tw,in)	40	°C
Temperatura de salida del agua (Tw,out)	25	°C
Temperatura ambiente (Ta)	25	°C
Humedad relativa (HR)	60	%
Temperatura de bulbo húmedo (Twb)	19	°C
Altura de la torre (h)	150	m
Diámetro inferior (Dinf)	80	m
Diámetro superior (Dsup)	50	m
Área de relleno (Arelleno)	7000	m ²
Temperatura Kelvin	273	K
Constante de Gases	8,314	Pa·m ³ / (mol·K)

Nota: Véase en la Tabla 1. La representación de los parámetros necesarios para realizar los estudios respectivos.

Tabla 2 Tiro Natural

Parámetro	Valor	Unidad
Huella de Terreno	5027	m ²
Potencia Térmico	4861,11	kW
Eficiencia Térmica	71,43	%
Presión de Tiro (ΔP)	35,86	Pa
Caudal de Aire	819,74	m ³ /s
Caudal Masico Aire	972,22	kg/s
Pérdida de Evaporación	7,13	m ³ /h
Pérdida de Arrastre	0,002	m ³ /h
Pérdida eficiencia Total de Agua	7,69	m ³ /h
Costo Agua Diario	56,16	\$ / día
Costo Energético	0	\$
Costo Operativo Anual	20.497,35	\$ / año

Nota: Véase en la Tabla 2 Lo valores finales que se obtuvieron a través de la simulación realizada a través de Python

Tabla 3. Geometría: Tiro Inducido

Parámetros Geométricos			
Altura de torre		15	m
Diámetro de torre		12	m
Área de relleno		600	m ²
Sistema de Ventilación			
Tipo	2	30	kW
Potencia total		60	kW



Velocidad del aire	2	m /s
Caudal de aire	72	m ³ /s
Área de flujo	36	m ²
Caudal de agua de enfriamiento	279	m ³ /h
Condiciones Operativas		
Carga térmica a disipar	4861,11	kW
Calor Latente	2454	kJ/kg
Costo de energía	\$ 0,10	kWh
Costo de agua	\$ 0,30	/m ³

Nota: Véase en la Tabla 3. los valores de diseño de la torre de enfriamiento de tiro inducido.

Tabla 4. Resultados: Tiro Inducido

Parámetro	Valor	Unidad
Caudal másico de aire	85,248	kg/s
Eficiencia térmica	71,43	%
Potencia térmica disipada	4861,11	kW
Pérdidas por evaporación	7,13	m ³ /h
Pérdidas por drift	0,558	m ³ /h
Blowdown (purga)	1,43	m ³ /h
Pérdidas totales de agua	9,114	m ³ /h
Consumo energético diario	1440	kWh/día
Costo energético diario	144	\$ / día
Costo de agua diario	65,62	\$ / día
Costo operativo diario total	209,62	\$ / día
Costo anual estimado	76.511,59	\$ / año

Nota: Véase en la Tabla 4. Lo valores finales que se obtuvieron a través de la simulación realizada a través de Python, para la simulación de la torre de Tiro Inducido.

Tabla 5. Resultados: Flujo Cruzado

Parámetro	Valor	Unidad
Caudal másico de aire	103,126	kg/s
Eficiencia térmica	60	%
Potencia térmica disipada	4861,11	kW
Pérdidas por evaporación	7,131	m ³ /h
Pérdidas por drift	0,56	m ³ /h
Blowdown (purga)	1,43	m ³ /h
Pérdidas totales de agua	9,12	m ³ /h
Consumo energético diario	2160	kWh/día
Costo energético diario	216	\$ / día
Costo de agua diario	65,63	\$ / día
Costo operativo diario total	281,63	\$ / día
Costo anual estimado	102.795,42	\$ / año

Nota: Véase en la Tabla 5. Lo valores finales que se obtuvieron a través de la simulación realizada a través de Python, para la simulación de la torre de Flujo Cruzado.

Tabla 6. Resultados: Torre Híbrida



Parámetro	Valor	Unidad
Caudal másico de aire	105,68	kg/s
Eficiencia térmica	55,72	%
Potencia térmica disipada	2430,55	kW
Pérdidas por evaporación	3,566	m ³ /h
Pérdidas por drift	0,56	m ³ /h
Blowdown (purga)	0,71	m ³ /h
Pérdidas totales de agua	4,84	m ³ /h
Consumo energético diario	2400	kWh/día
Costo energético diario	240	\$ / día
Costo de agua diario	34,82	\$ / día
Costo operativo diario total	274,82	\$ / día
Costo anual estimado	100.310,92	\$ / año

Nota: La torre híbrida disipa 2430,55 kW en su sección húmeda mediante evaporación, mientras que los 2430,55 kW restantes se disipan en la sección seca por convección forzada, alcanzando un total de 4861,11 kW.

Tabla 7. Análisis Comparativo General

Criterio	Tiro Natural	Tiro Inducido	Flujo Cruzado	Híbrida
Eficiencia térmica	71,43 %	71,43 %	60,00 %	55,72 %
Potencia térmica disipada	4861,11 kW	4861,11 kW	4861,11 kW	4861,11 kW
Caudal másico de aire	972,22 kg/s	85,25 kg/s	103,13 kg/s	105,68 kg/s
Pérdidas por evaporación	7,13 m ³ /h	7,13 m ³ /h	7,13 m ³ /h	3,57 m ³ /h
Pérdidas por drift	0,002 m ³ /h	0,56 m ³ /h	0,56 m ³ /h	0,56 m ³ /h
Blowdown (purga)	-	1,43 m ³ /h	1,43 m ³ /h	0,71 m ³ /h
Pérdidas totales de agua	7,69 m ³ /h	9,11 m ³ /h	9,12 m ³ /h	4,84 m ³ /h
Consumo energético diario	0 kWh/día	1440 kWh/día	2160 kWh/día	2400 kWh/día
Costo operativo anual	\$20.497,35	\$76.511,59	\$102.795,42	\$100.310,92
Huella de terreno	5027 m ²	600 m ²	317 m ²	800 m ²

Nota: Véase en la Tabla 7. La eficiencia térmica permite identificar rápidamente las tecnologías más efectivas en transferencia de calor. Aunque el tiro natural y el tiro inducido comparten la misma eficiencia (71,43 %), sus perfiles operativos son radicalmente distintos: el primero es pasivo y económico, pero requiere gran espacio; el segundo es compacto y controlable, pero consume mucha energía [11] [20]. La torre híbrida, pese a su baja eficiencia térmica (55,72 %), emerge como la opción más sostenible hídricamente, ideal para regiones áridas [9] [10]. El flujo cruzado, aunque compacto, presenta valores no favorables en el equilibrio entre eficiencia, consumo energético y pérdidas de agua [12] [22].

Tabla 8. Evaluación por Desempeño Térmico

Tecnología	Eficiencia Térmica (%)	Consumo Energético (kWh/día)	Perdidas de Agua (m ³ /h)	Costo Operacional anual (\$/año)	Huella de Terreno (m ²)
Tiro Natural	71,43	0	7,69	20.497	5.027
Tiro Inducido	71,43	1.440	9,11	76.512	600
Flujo Cruzado	60,00	2.160	9,12	102.795	317
Híbrida	55,72	2.400	4,84	100.311	800

Véase en la Tabla 6. En términos térmicos, el tiro natural y el tiro inducido comparten la máxima eficiencia (71,43 %), gracias a su diseño de flujo contracorriente, que maximiza la transferencia de entalpía [18] [13]. Sin embargo, sus perfiles operativos son radicalmente distintos: el tiro natural opera sin consumo



energético en eficiencia energética, mientras que el tiro inducido consume 1.440 kWh/día, lo que impacta su costo operativo [11] [20].

La torre híbrida, aunque tiene la menor eficiencia térmica (55,72 %), destaca como la más sostenible hídricamente, con pérdidas de agua un 37 % menores que el tiro inducido [17] [10]. En contraste, el flujo cruzado presenta el peor desempeño general, con baja eficiencia térmica, alto consumo energético y las mayores pérdidas de agua [12] [22] [22].

Este análisis jerárquico evidencia la existencia de trade-offs clave: no existe una tecnología óptima en todos los criterios. La selección final debe basarse en las prioridades del sitio: eficiencia energética (tiro natural), disponibilidad de espacio (flujo cruzado), o escasez hídrica (torre híbrida) [17].

Tabla 7. Estimación del CAPEX por Tecnología.

Tecnología	Componentes Clave	Factores de Costo	CAPEX estimado (\$)
Tiro Natural	Estructura hiperbólica, relleno, sistema de distribución de agua, eliminadores de niebla	Alto costo por tamaño físico, materiales (concreto o acero), baja complejidad mecánica	2.500.000-3.500.000
Tiro Inducido	Carcasa, relleno, ventiladores, motores, sistema de control	Costo moderado, equipos estandarizados, menor tamaño	800.000-1.200.000
Flujo Cruzado	Carcasa, relleno, ventiladores laterales, sistema de agua	Diseño simple, fácil mantenimiento, bajo consumo energético inicial	600.000-900.000
Torre Híbrida (Dry-Wet)	Sección húmeda + sección seca (intercambiadores de calor), ventiladores, sistema de control avanzado	Alta complejidad, equipos duales, mayor costo de materiales y control.	1.800.000-2.500.000

Nota: Véase en la Tabla 7 para observar las diferencias en la inversión inicial (CAPEX) entre las distintas tecnologías. Estas variaciones se deben principalmente a las diferencias en la complejidad estructural, el tipo de sistema de ventilación y la presencia de componentes mecánicos y motores [11] [20].

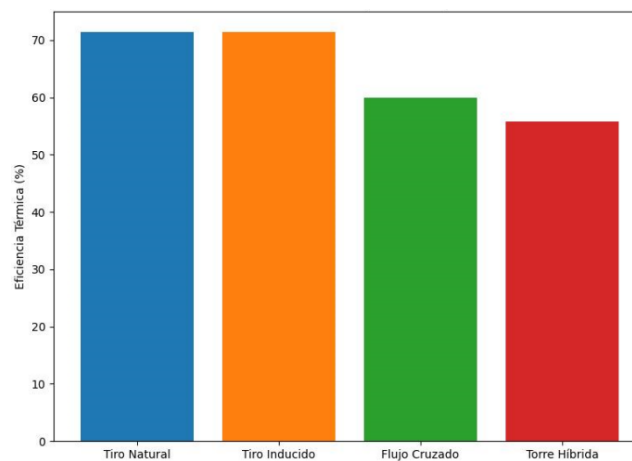


Figura 2 Evaluación de la Eficiencia Térmica.

Evaluación de la Eficiencia Térmica.

La superioridad del flujo contracorriente (tiro natural e inducido) se explica termodinámicamente por la maximización de la diferencia de entalpía entre el aire de entrada y salida [2] [18]. En condiciones de entrada de 25 °C y 60 % HR, la temperatura de bulbo húmedo es de 19 °C, lo que define el límite teórico de enfriamiento [1]. El diseño contracorriente permite que el aire se acerque a esta condición de saturación adiabática, absorbiendo calor latente de manera eficiente [13]. En contraste, el flujo cruzado presenta una menor diferencia de entalpía debido a un contacto subóptimo entre fluidos, lo que limita la capacidad de saturación del aire y reduce la transferencia de calor latente en hasta un 16 % [12] [22].



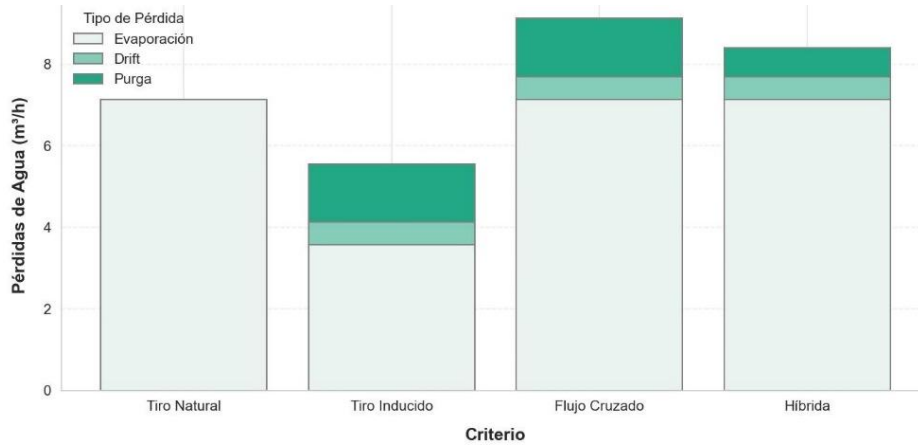


Figura 3 Pérdidas de Agua por Tipo de Torre de Enfriamiento

Pérdidas de Agua por Tipo de Torre de Enfriamiento.

En orden decreciente de sostenibilidad hídrica, la torre híbrida (4,84 m³/h) es la más eficiente, seguida por el tiro natural (7,69 m³/h), y finalmente el tiro inducido (9,11 m³/h) y el flujo cruzado (9,12 m³/h). Este orden refleja un trade-off claro entre eficiencia térmica y consumo hídrico, donde las tecnologías más eficientes térmicamente (tiro natural e inducido) no son necesariamente las más eficientes hídricamente [17] [10] [12].

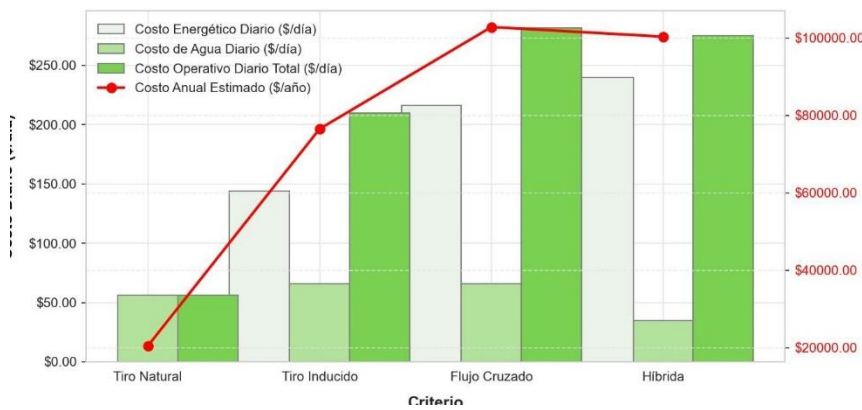


Figura 4 Apreciación de Costos Diarios y Anuales por Tecnología

Apreciación de Costos Diarios y Anuales por Tecnología.

Este gráfico evidencia que el costo energético es el principal driver del costo operativo. El tiro natural, no presenta costo energético, tiene un costo diario de sólo \$56,16, mientras que la torre híbrida supera los \$270/día. Esta relación acumulativa se traduce en diferencias de más de \$80.000 anuales, lo que convierte el consumo energético en el factor más decisivo en la selección tecnológica, excepto en contextos con escasez hídrica [11] [20].

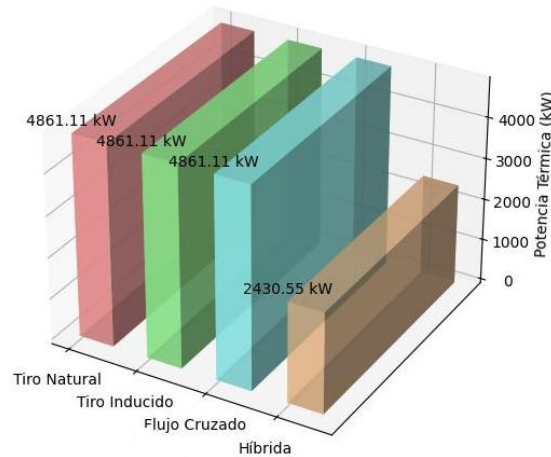


Figura 5 Evaluación de la Carga Térmica Disipada

Evaluación de la Carga Térmica Disipada.

La Figura 5 ilustra un principio clave: las torres húmedas (tiro natural, inducido, cruzado) aprovechan el enfriamiento evaporativo, que depende del calor latente de vaporización (2454 kJ/kg), un mecanismo altamente eficiente [12] [1]. En cambio, la torre híbrida disipa el 50 % de la carga térmica mediante convección forzada en su sección seca, un proceso que depende únicamente del calor sensible ($cp \cdot \Delta T$), mucho menos eficiente [17]. Termodinámicamente, esto implica que se requiere un mayor caudal de aire y mayor trabajo de ventilación para lograr el mismo enfriamiento, lo que explica su mayor consumo energético (2.400 kWh/día) [20].

5. Discusión

Contribuciones clave

Este estudio aporta una evaluación integral y cuantitativa del desempeño térmico, energético, hídrico y económico de cuatro tecnologías de torres de enfriamiento (tiro natural, tiro inducido, flujo cruzado y torre híbrida) aplicadas al proceso de destilación de GLP. A diferencia de investigaciones previas que analizan aspectos aislados como solo la eficiencia térmica o el consumo de agua, este trabajo integra múltiples criterios en un marco comparativo estandarizado, utilizando simulaciones validadas mediante el método NTU y la ecuación de Merkel.

La principal contribución es el desarrollo de un modelo computacional robusto en Python, capaz de simular con precisión el comportamiento de distintas configuraciones bajo condiciones operativas realistas. Este modelo no solo reproduce tendencias esperadas en la literatura (como la alta eficiencia del flujo contracorriente), sino que también permite identificar trade-offs clave entre variables críticas, facilitando una toma de decisiones más informada en el diseño de plantas petroquímicas [1] [17].

Además, se proporciona una visualización multicriterio (Figura 6) que permite comparar tecnologías en dimensiones diversas, desde eficiencia térmica hasta huella de terreno, lo cual es de gran utilidad para ingenieros y gestores industriales que deben equilibrar objetivos técnicos, económicos y ambientales.

Limitaciones

Las limitaciones identificadas en este estudio, particularmente el uso de condiciones ambientales constantes, justifican de manera técnica y urgente la necesidad de extender el modelo a escenarios climáticos extremos. Dado que estudios como el de Yang et al. [7] [23] han demostrado que temperaturas superiores a 35 °C y humedades relativas mayores al 70 % pueden reducir la eficiencia térmica hasta en un 15 %, excluir estos escenarios del análisis representa un riesgo significativo para la operación real de plantas industriales en regiones cálidas o durante eventos de cambio climático [7] [23].

Por lo tanto, el siguiente paso crítico es integrar una simulación dinámica transitoria que permita evaluar el desempeño de las torres bajo condiciones variables de temperatura y humedad, utilizando el mismo marco teórico validado (método NTU y ecuación de Merkel). Es necesaria para garantizar la robustez del modelo en condiciones reales no estacionarias [2].

Se recomienda enfocar este desarrollo en tecnologías híbridas con mayor proporción de sección seca (>50 % de carga disipada por convección forzada), sistemas de pre-enfriamiento del aire (nebulización,

cooling pads), y el uso de rellenos avanzados resistentes a la incrustación [9] [17]. Además, la implementación de controladores adaptativos basados en inteligencia artificial permitiría optimizar el consumo energético en tiempo real, mejorando la resiliencia operativa.

Implicaciones teóricas y prácticas

Desde el punto de vista teórico, este trabajo refuerza la validez de los modelos basados en el método NTU y la ecuación de Merkel para la simulación de torres de enfriamiento, incluso en configuraciones complejas como las torres híbridas. Además, confirma hallazgos previos sobre la superioridad del flujo contracorriente (tiro natural e inducido) en términos de eficiencia térmica, y valida la existencia de un compromiso inherente entre eficiencia energética y consumo hídrico [17] [9].

Desde una perspectiva práctica, los resultados ofrecen una guía clara para la selección de tecnologías en proyectos industriales reales:

El tiro natural es la opción más eficiente y económica en operación, ideal para instalaciones con espacio disponible y sin costo energético. El tiro inducido, aunque más costoso en energía, permite diseños más compactos y controlados. El flujo cruzado es adecuado para plantas con restricciones de espacio, aunque con menor eficiencia. La torre híbrida emerge como la mejor alternativa en zonas con escasez hídrica, al reducir las pérdidas de agua en más del 37% respecto a las torres convencionales. Estas implicaciones permiten a los ingenieros de proceso diseñar sistemas de enfriamiento más sostenibles, alineados con los principios de eficiencia energética, uso racional del agua y rentabilidad operativa.

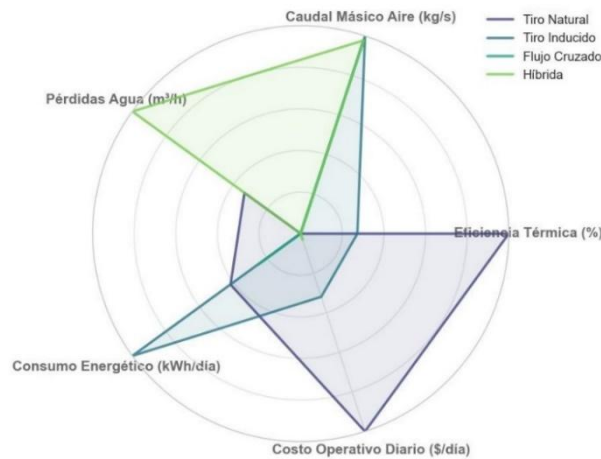


Figura 6 Evaluación Multivariable de Desempeño por Sistema de Enfriamiento

El sistema de tiro natural funciona por convección natural, aprovechando la diferencia de densidad entre el aire caliente del interior y el aire frío del exterior. Al no necesitar ventiladores ni energía mecánica, no tiene consumo energético. Desde el punto de vista exergético, esto significa que no se pierde exergía en trabajo externo, lo que mejora su eficiencia al usar gradientes naturales de temperatura y humedad. Aunque requiere más espacio, su bajo costo operativo es una ventaja clave (ver Figura 4 y Tabla 4). Además, es el más eficiente térmicamente y mueve uno de los mayores caudales de aire, destacando por su alto desempeño técnico.

En comparación, sistemas como el de flujo cruzado y el híbrido consumen más energía y agua, lo que eleva sus costos operativos y reduce su sostenibilidad, especialmente en zonas con escasez hídrica. De esta manera, pese a su simplicidad, el tiro natural ofrece el mejor equilibrio entre eficiencia, bajo consumo y economía operativa, superando a tecnologías más complejas.

El objetivo principal del trabajo era desarrollar un modelo computacional validado para evaluar y comparar cuatro configuraciones tecnológicas tiro natural, tiro inducido, flujo cruzado y torre híbrida (dry-wet) bajo condiciones operativas realistas, y los hallazgos obtenidos permiten cumplir con este propósito de manera integral. La eficiencia térmica del 71,43% alcanzada tanto por el sistema de tiro natural como por el de tiro inducido es coherente con la literatura científica, que destaca el alto rendimiento de los sistemas de flujo contracorriente [17] [18] [13]. Este valor refleja una transferencia de calor altamente efectiva, favorecida por un mayor tiempo de contacto entre el agua y el aire, lo que valida el modelo desde una perspectiva termodinámica.

El desempeño inferior del flujo cruzado (60 % de eficiencia) y de la torre híbrida (55,72 %) es consistente con estudios previos que señalan limitaciones inherentes a sus diseños. En el caso del flujo cruzado, la distribución no uniforme del aire y el menor tiempo de contacto reducen su efectividad [20], mientras que la torre híbrida, aunque innovadora, sacrifica eficiencia térmica en la sección húmeda al disipar solo la mitad de la carga térmica por evaporación [21], como se observa en los resultados. Este hallazgo refuerza lo reportado por Madyshev [17] [2], quienes destacan el potencial de las torres híbridas para reducir el consumo de agua, pero no necesariamente para máximo eficiencia térmica.

La huella de terreno es un factor crítico en la toma de decisiones técnicas y estratégicas. Como se ilustra en la Figura 6, el tiro natural requiere una superficie considerable debido a su diseño pasivo, mientras que las torres de flujo cruzado y híbridas son mucho más compactas [24].

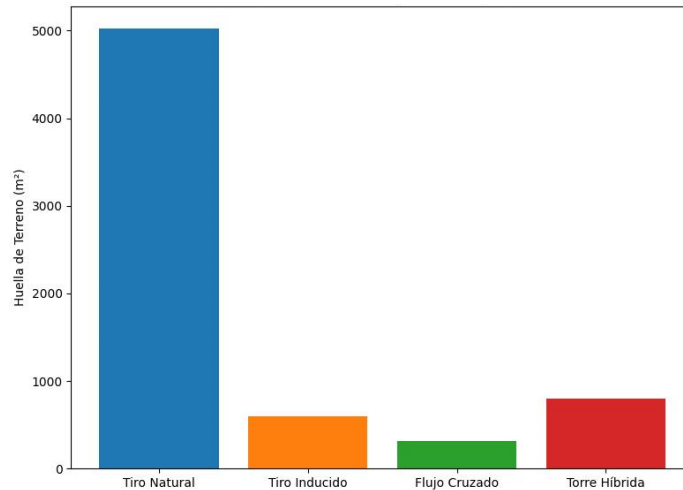


Figura 7 Huella de Terreno por Tecnología

La huella de terreno varía considerablemente: el tiro natural requiere alrededor de 5.000 m², mientras que el flujo cruzado es el más compacto (317 m²), seguido por el tiro inducido (600 m²) y la torre híbrida (800 m²) (Tabla 5). Esta diferencia es crítica en plantas con espacio limitado. Aunque el tiro natural es el más eficiente y económico en operación (Figura 4), su tamaño puede ser inviable en áreas urbanas o con restricciones de espacio [11] [15].



Figura 8 Simulación para el Análisis Comparativo Multicriterio

En la Figura 8. La simulación computacional, apoyada por Python y Excel, permitió validar y comparar de manera integral las diferentes tecnologías de torres de enfriamiento para plantas de destilación fraccionada de GLP [25]. Los resultados obtenidos son valiosos para la selección óptima de tecnología, teniendo en cuenta factores críticos como eficiencia térmica, costos operativos, pérdidas de agua y huella de terreno [19] [11] [14] [26]. Este enfoque innovador, basado en la integración de tecnología y procesos

petroquímicos, facilitó la obtención de resultados precisos en tiempos reducidos, superando las limitaciones de métodos tradicionales.

Por ejemplo, aunque el tiro natural presenta el menor costo operativo anual (20.497,35 USD/año) y su elevada huella de terreno y alto costo inicial (CAPEX) pueden limitar su viabilidad en plantas con restricciones espaciales. En contraste, el tiro inducido, pese a su alto costo operativo (76.511,59 USD/año), ofrece una solución viable en instalaciones donde el espacio es limitado y se requiere un control preciso del proceso.

La reducción del 37 % en las pérdidas de agua con la torre híbrida (4,84 m³/h frente a 9,11 m³/h en el tiro inducido) representa una ventaja ambiental significativa, especialmente en regiones con escasez hídrica, tal como lo sugieren O. V. Hlaváček [15]. Sin embargo, este beneficio se ve compensado por un mayor consumo energético (2.400 kWh/día), lo que eleva su costo operativo a niveles comparables al flujo cruzado [27]. Esta compensación entre sostenibilidad hídrica y eficiencia energética subraya la necesidad de un análisis de compromiso (trade-off) en la selección tecnológica.

Entre las limitaciones del estudio se encuentra el uso de condiciones ambientales constantes, lo que puede subestimar el impacto de variaciones climáticas extremas, como las analizadas por Yang et al. [7] [17], que pueden reducir la eficiencia térmica hasta en un 15%. Además, el modelo no considera el deterioro del relleno ni las variaciones en la calidad del agua, factores que afectan el rendimiento a largo plazo. A pesar de estas limitaciones, el modelo validado mediante la ecuación de Merkel y el método NTU ofrece una herramienta robusta para la simulación y optimización de torres de enfriamiento en la industria petroquímica, con potencial para adaptarse a otros procesos de separación térmica [19] [28] [9].

El análisis multicriterio presentado en Tabla 4 y visualizado en Figura 1, Figura 2 y Figura 3 permite identificar claramente las ventajas y limitaciones de cada tecnología. La selección final debe basarse en un equilibrio entre eficiencia térmica, sostenibilidad hídrica, costo operativo y condiciones locales, como la disponibilidad de espacio, el costo de la energía y la escasez de agua.

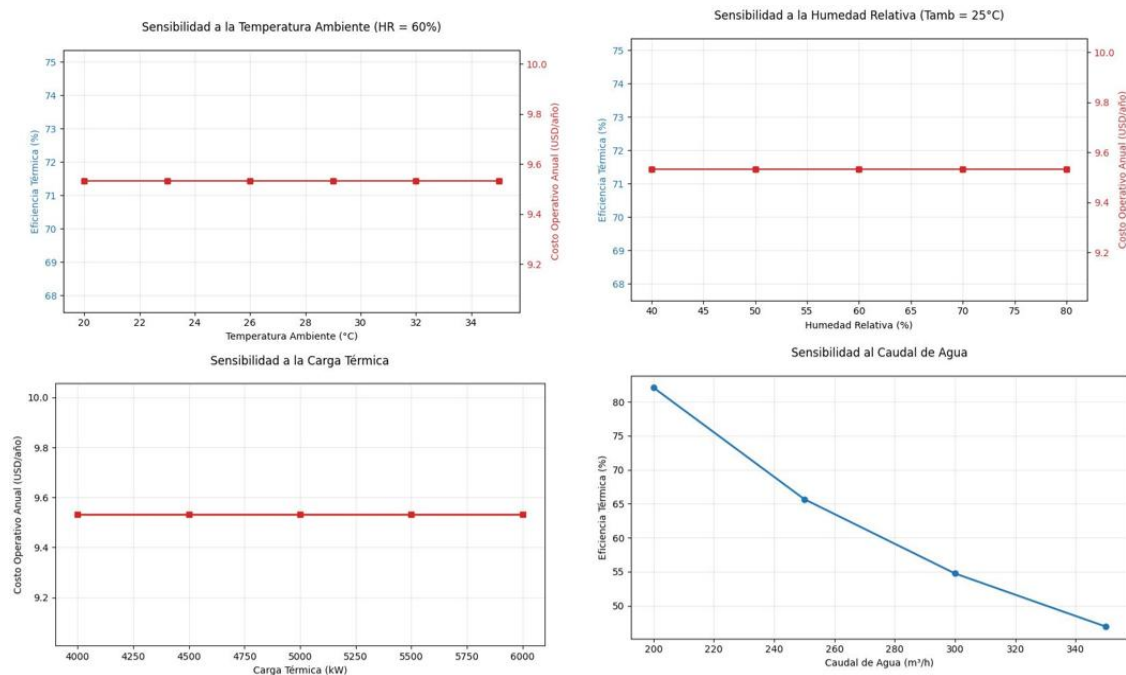


Figura 9 Análisis de Sensibilidad Univariable

Este análisis muestra que los parámetros más influyentes en el desempeño térmico son:

- Humedad relativa del aire: a mayor HR, menor potencial de evaporación.
- Caudal de agua: influye directamente en la capacidad de disipación térmica.
- Temperatura ambiente: impacto moderado, pero crítico en climas cálidos (>35 °C).
- Costo operativo: relativamente estable, lo que favorece tecnologías con bajo consumo energético como el tiro natural.



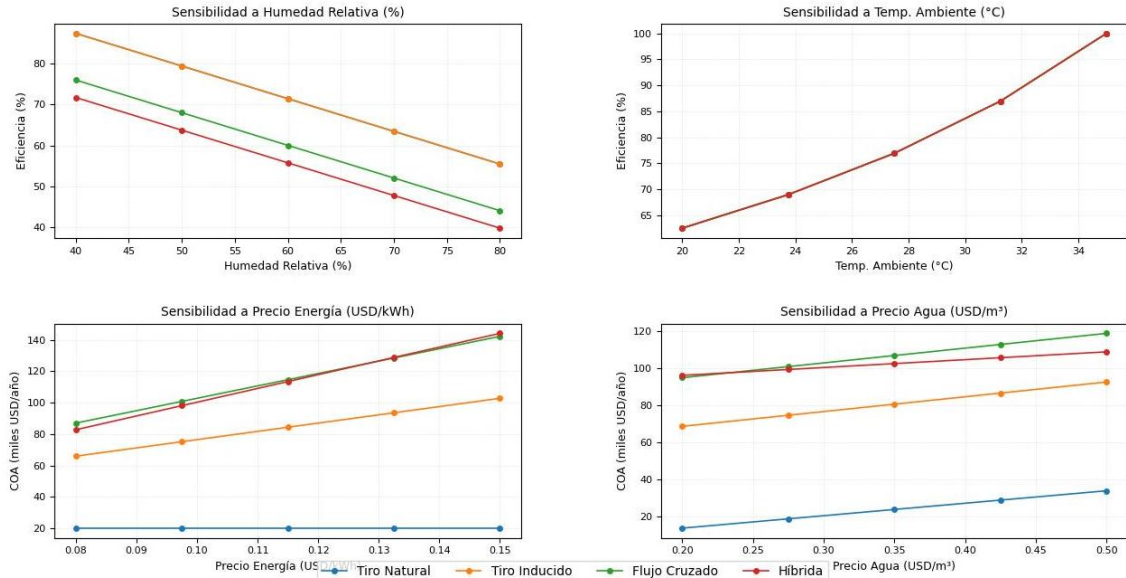


Figura 10 Análisis de Sensibilidad Cuantitativo.

Este gráfico cuantifica los trade-offs entre eficiencia, costo y sostenibilidad. Permite identificar escenarios óptimos: En zonas con escasez hídrica: torre híbrida es la mejor opción, pese a su mayor consumo energético [17] [10]. En plantas con espacio limitado: flujo cruzado o tiro inducido son viables, aunque con compromisos en eficiencia o costo [11] [27]. En plantas con espacio y bajo costo de terreno: tiro natural es la opción más eficiente y económica [15]; Tabla 5; Figura 4).

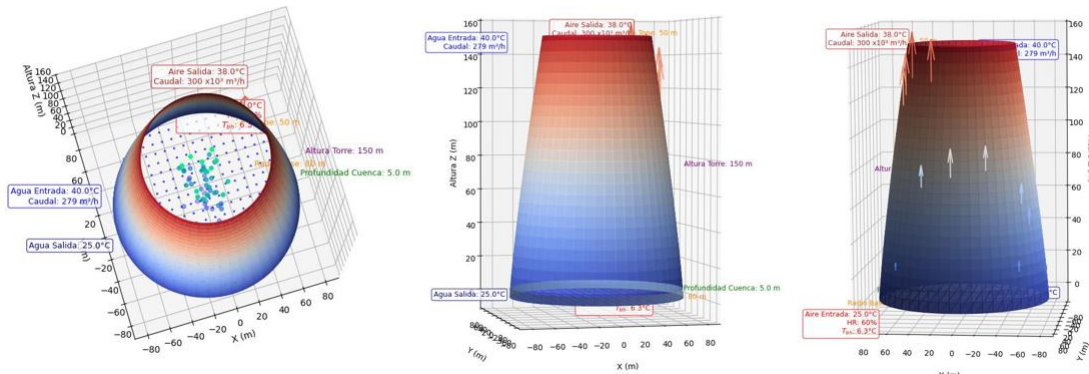


Figura 11 Modelo 3D de una Torre de Enfriamiento de Tiro Natural con Gradiente Térmico y Parámetros Operativos

En la Figura 11. El diseño de flujo contracorriente, en el que el agua caliente desciende por el relleno mientras el aire seco asciende, es fundamental para maximizar la eficiencia de la transferencia de calor y masa [18] [13]. Aunque la diferencia de temperatura inicial entre el agua de entrada (40°C) y el aire ambiente (25°C) es reducida, el proceso de evaporación parcial del agua genera un potencial termodinámico significativo [2]. Este mecanismo permite que el aire absorba calor latente, enfriando eficazmente el agua hasta alcanzar una temperatura de salida de 25°C, cercana a la temperatura de bulbo húmedo del aire de entrada (19°C), lo cual es clave para el rendimiento del sistema [1]; Tabla 1.

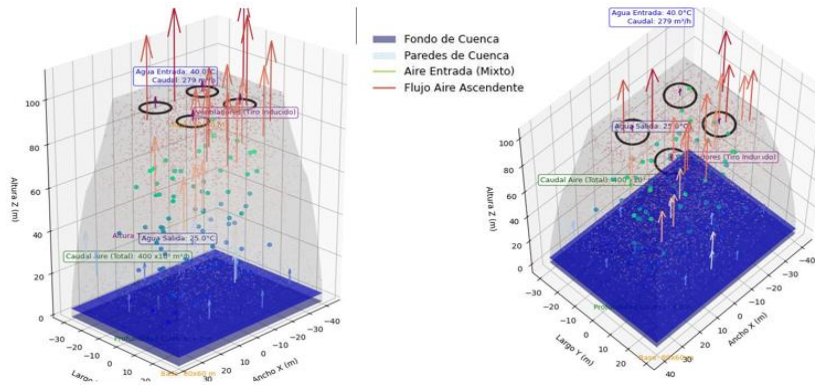


Figura 12 Modelo 3D de una Torre de Enfriamiento Híbrida con Gradiente Térmico y Parámetros Operativos

En la Figura 12. La torre híbrida combina dos mecanismos de enfriamiento para optimizar su desempeño térmico y hídrico. En la sección inferior, correspondiente al sistema húmedo, el agua caliente entra a 40°C y desciende por el relleno, mientras que el aire ambiente ingresa a 25°C por la base (Tabla 1). Durante su contacto directo, se produce una transferencia de calor y masa mediante evaporación parcial del agua, proceso que aprovecha el calor latente (2454 kJ/kg) para enfriar el agua hasta 25 °C, mientras el aire se calienta y humedece hasta alcanzar aproximadamente 38°C [17]. En la sección superior, dedicada al enfriamiento seco, el aire ya saturado continúa ascendiendo sin contacto con agua, siendo impulsado por convección forzada, y mantiene una temperatura cercana a 38°C. Este diseño dual permite una gestión eficiente de la carga térmica, reduciendo significativamente las pérdidas de agua hasta un 37 % frente al tiro inducido (Tabla 5; Figura 3), al disipar solo la mitad del calor por evaporación [17] [10]. Así, la torre híbrida combina la eficacia del enfriamiento evaporativo con la sostenibilidad hídrica del sistema seco, ofreciendo una solución flexible y eficiente, especialmente en regiones con restricciones de recursos hídricos [21].

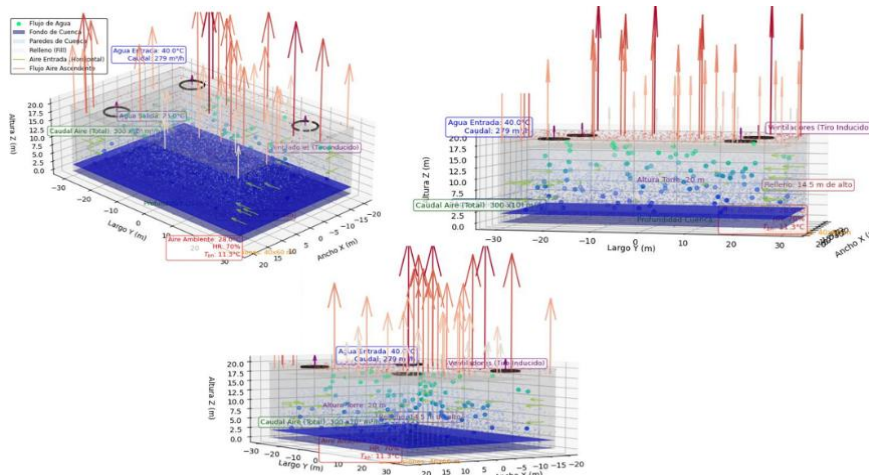


Figura 13 Modelo 3D de una Torre de Enfriamiento de Flujo Cruzado con Gradiente Térmico y Parámetros Operativos

En la Figura 13. La torre de flujo cruzado opera bajo un diseño en el que el agua caliente desciende por el relleno por gravedad, mientras el aire seco ingresa horizontalmente a través de las paredes laterales, estableciendo un patrón de flujo perpendicular entre ambos fluidos [22]. Esta configuración, conocida como flujo cruzado, limita el tiempo de contacto entre el aire y el agua en comparación con los sistemas de flujo contracorriente, lo que se traduce en una eficiencia térmica inferior (60 %) respecto a las torres de tiro natural e inducido (71,43 %) (Tabla 5; Figura 2). Esta reducción en el rendimiento se debe principalmente a dos factores: en primer lugar, el menor tiempo de contacto entre los fluidos, que disminuye la capacidad de transferencia de calor y masa; en segundo lugar, la distribución no uniforme del flujo de aire a través del relleno, lo que puede generar zonas de estancamiento o canalización, reduciendo aún más la efectividad del enfriamiento [12] [21].

Efecto de Convección Forzada: El aire entra a 25°C y absorbe calor del agua durante su paso transversal, saliendo a aproximadamente 38 °C [12] [22] [22]. Este ligero incremento térmico indica una



transferencia de calor moderada, insuficiente para generar un flujo convectivo natural significativo. Por ello, muchas torres de flujo cruzado incorporan ventiladores mecánicos para impulsar el aire, lo que introduce un consumo energético adicional [11]. Aunque el efecto de convección forzada mejora el flujo de aire, no compensa completamente las limitaciones inherentes al diseño, especialmente en condiciones de alta carga térmica [21].

La figura 14. Transferencia de Calor en Flujo Contracorriente La torre de tiro inducido opera en flujo contracorriente, donde el agua caliente desciende por el relleno mientras el aire es impulsado hacia arriba mediante ventiladores. Esta configuración maximiza el tiempo de contacto y el potencial termodinámico entre los fluidos, logrando una eficiencia térmica del 71,43 %, la cual es comparable a la del tiro natural [18] [13]. El aire entra a 25°C y absorbe calor del agua por evaporación, elevando su entalpía hasta alcanzar 38°C. Este calentamiento, combinado con el impulso mecánico de los ventiladores, genera una corriente de convección forzada que garantiza un flujo de aire uniforme y controlado, incluso bajo condiciones ambientales variables [11] [20]. A pesar de su alto rendimiento térmico, esta tecnología presenta un elevado consumo energético (1440 kWh/día), principalmente asociado al sistema de ventilación, lo que se traduce en un costo operativo anual de \$76.511,59 (Tabla 2.1; Figura 4). Además, las pérdidas de agua por evaporación y drift son significativas (9,114 m³/h), lo que requiere un mayor suministro de reposición [12] [17]. Como trabajo futuro, se propone simular el desempeño de las torres bajo condiciones extremas, como una temperatura de bulbo húmedo de 35°C o 38°C, escenarios comunes en regiones áridas o durante olas de calor. En tales condiciones, la diferencia entre la temperatura del agua caliente (40°C) y el bulbo húmedo se reduce a menos de 5°C, limitando severamente la capacidad de enfriamiento evaporativo. Modelos basados en el método NTU y la eficiencia de saturación del aire podrían predecir la caída de rendimiento, permitiendo evaluar tecnologías híbridas con mayor capacidad seca o sistemas con preenfriamiento del aire mediante nebulización. Además, se recomienda investigar el uso de rellenos con mayor área específica y resistencia a la incrustación, así como el control dinámico del flujo de aire mediante algoritmos de inteligencia artificial para optimizar el consumo energético en tiempo real.

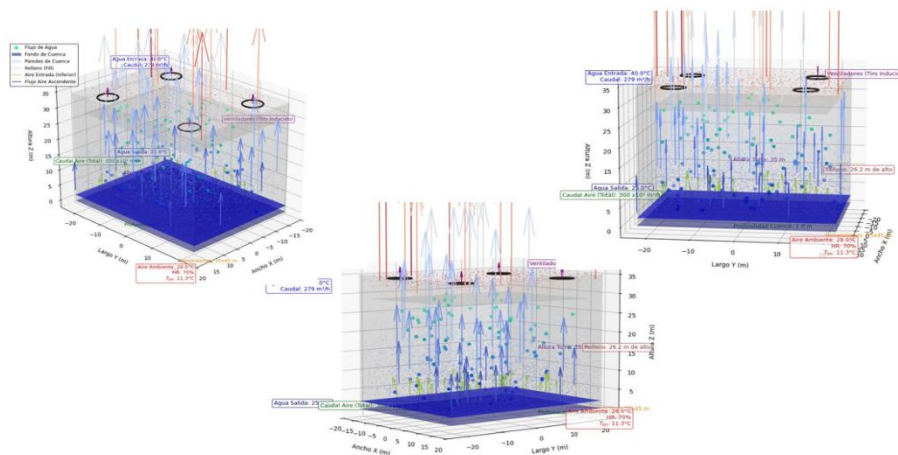


Figura 14 Modelo 3D de una Torre de Enfriamiento de Tiro Inducido con Gradiente Térmico y Parámetros Operativos

6. Conclusión

El presente estudio permitió desarrollar y validar un modelo térmico y de simulación computacional para evaluar y comparar el desempeño de cuatro configuraciones de torres de enfriamiento tiro natural, tiro inducido, flujo cruzado y torre híbrida (dry-wet) en el contexto de una planta de destilación de gas licuado de petróleo (GLP). Los resultados demuestran que los sistemas de tiro natural y tiro inducido alcanzan la mayor eficiencia térmica (71,43%), gracias a su diseño de flujo contracorriente, que maximiza la transferencia de calor entre el agua y el aire. En contraste, el flujo cruzado presenta una eficiencia del 60%, y la torre híbrida registra el valor más bajo (55,72%), debido a la reducción de la carga térmica disipada por evaporación en su sección húmeda. Desde el punto de vista económico, el tiro natural se posiciona como la opción más favorable, con un costo operativo anual de 20.497,35 USD/año y sin costo energético, lo que lo convierte en una solución altamente eficiente en términos operativos.

Por otro lado, el tiro inducido, aunque presenta la misma eficiencia térmica, tiene un costo operativo significativamente mayor (76.511,59 USD/año) debido al alto consumo energético del sistema de

ventilación. El flujo cruzado y la torre híbrida presentan los costos operativos anuales más elevados (102.795,42 USD/año y 100.310,92 USD/año, respectivamente), lo que limita su viabilidad en escenarios donde la eficiencia económica es prioritaria. No obstante, la torre híbrida destaca por su ventaja hídrica, reduciendo las pérdidas de agua en un 37 % respecto al tiro inducido, lo que la convierte en una alternativa valiosa en regiones con escasez de recursos hídricos. En conjunto, este trabajo confirma que la selección de la tecnología de torre de enfriamiento debe basarse en un análisis multicriterio que considere no solo la eficiencia térmica, sino también el consumo energético, las pérdidas de agua, el costo operativo, la huella de terreno y las condiciones ambientales locales.

El modelo desarrollado en este estudio proporciona una herramienta integral y reproducible para la toma de decisiones técnica, económica y ambientalmente sostenible en la industria petroquímica. Como futura línea de investigación, se recomienda extender el modelo a condiciones climáticas variables, incorporar el deterioro del relleno y el impacto de la calidad del agua, así como realizar análisis de ciclo de vida (ACV) para evaluar el impacto ambiental a largo plazo de cada tecnología.

La integración de datos técnicos, económicos y ambientales en un análisis multicriterio, como el presentado en Tabla 4 y las Figura 1 a 5, proporciona una herramienta robusta para la toma de decisiones en la industria petroquímica. Se recomienda el uso del tiro natural en plantas con espacio disponible y bajo costo de terreno, la torre híbrida en regiones con escasez hídrica, y el tiro inducido como un equilibrio razonable entre eficiencia y costo. Este enfoque puede extenderse a otros procesos industriales que requieran disipación térmica intensiva.

Referencias

- [1] S. L. A. D. J. e. a. Araujo, «Comparative study of cooling tower fills: experimental analysis and CFD simulation of an alternative fill.,» *J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 46, p. 412, 2024.
- [2] A. a. L. E. Laptev, «Mathematical models and calculation of the coefficients of heat and mass transfer in the packings of mechanical-draft towers.,» *J. Eng. Phys.*, vol. 90, n° 3, p. 644–650, 2017.
- [3] A. a. L. E. Laptev, «Mathematical models of friction on the surface of phase separation and heat and mass transfer in film units of cooling-tower sprinklers with intensifiers.,» *Theor. Found. Chem. Eng.*, vol. 55, n° 5, p. 906–913, 2021.
- [4] E. S. E. a. L. A. Lapteva, «Numerical estimation of the heat and mass transfer efficiency considering nonuniformity in water and air distribution, Teploenergetika.,» *Teploenergetika*, vol. 4, p. 52–59, 2020.
- [5] E. L. A. Lapteva, «Mathematical Model and Experimental Data for Water Cooling in Counterflow Film Cooling Towers.,» *Theor Found Chem Eng.*, vol. 57, p. 469–477, 2023.
- [6] L. Z. Q. & S. X. Li, «Study on salt deposition distribution and environmental effect of seawater cooling tower.,» *Sci Rep*, vol. 15, p. 11886, 2025.
- [7] S. L. P. X. D. e. a. Yang, «Study on the performance of open countercurrent heat source tower under low temperature and high humidity environment.,» *Sci Rep*, vol. 15, p. 26005, 2025.
- [8] I. K. V. Madyshev, «Determination of Heat and Mass Emission Coefficients in a Hybrid Cooling Tower with Transversely Finned Radiator Pipes.,» *J Eng Phys Thermophy.*, vol. 97, p. 1050–1057, 2024.
- [9] I. D. O. Madyshev, «Experimental Study of Thermal Characteristics of the Cooling Tower Sprinkler Dry Block.,» *J Eng Phys Thermophy.*, vol. 98, p. 90–99, 2025.
- [10] O. V. A. Hlaváček, «Reduction of Water Consumption for Heating Plant Cooling with an Indirect Cooling System.,» *Water Conserv Sci Eng.*, vol. 9, p. 55, 2024.
- [11] M. B. Rafat Al-Waked, «simulation of wet cooling towers.,» *Applied Thermal Engineering.*, vol. 26, n° 4, pp. 382–395, 2006.
- [12] M. B. A. K. M. Lemouari, «Experimental analysis of heat and mass transfer phenomena in a direct contact evaporative cooling tower.,» *Energy Conversion and Management.*, vol. 50, n° 6, pp. 1610–1617, 2009.
- [13] K. Z. T. & E. M. Sabdenov, «Modeling of Cooling Tower Operation with Consideration for the Chemical Work in the Steam–Air Mixture.,» *J Eng Phys Thermophy.*, vol. 96, p. 1081–1088, 2023.
- [14] L. A., «Mass transfer in engineering practice.,» *AIChE J.*, vol. 31, n° 1, p. 176–176, 1983.
- [15] C. M. B. R. Klimanek A., «3D CFD modeling of natural draft wet-cooling tower with flue gas injection.,» *Appl Therm Eng.*, vol. 91, p. 824–833, 2015.



- [16] S. K. A. Ziganshina, «Heat and Mass Transfer of a Gas–Air Mixture in the Stack of an Evaporative Cooling Tower.» *J Eng Phys Thermophy*, vol. 95, p. 673–679, 2022.
- [17] O. S. D. a. A. V. D. I. N. Madyshev, «Efficiency of cooling the water droplets within jet-film unit of cooling tower filler.» *MATEC Web Conf*, vol. 224, p. 02079, 2018.
- [18] S. R. A. M. R. T. Mehdi Rahmati, «Investigation of heat transfer in mechanical draft wet cooling towers using infrared thermal images: An experimental studyÉtude expérimentale sur le transfert de chaleur dans les tours de refroidissement humides à tirage mécanique par thermographie infrar.» *International Journal of Refrigeration*, vol. 88, pp. 229–238, 2018.
- [19] Z. Z. G. M. H. S. Dang Z, «Numerical simulation of thermal performance for super large-scale wet cooling tower equipped with an axial fan.» vol. 135, p. 220–234, 2019.
- [20] R. J. K. A. L. M. Navarro P, «Effect of fill length and distribution on the thermal performance of an inverted cooling tower.» vol. 231, p. 120876, 2023.
- [21] I. M. V. K. O. D. V. Z. A.V. Dmitriev, «Experimental investigation of fill pack impact on thermal-hydraulic performance of evaporative cooling tower.» *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 22, n° 1, p. 100835, 2021.
- [22] G. C. P. a. P. P. Raj, «Comparative analysis of two different types of fills used in wet cooling tower for higher-scale water with conventional film type fill.» *Heat Transfer*, vol. 48, n° 8, p. 4000–4015, 2019.
- [23] I. F. M. A. M. e. a. Chy, «Dynamic analysis of cooling tower considering two different column modeling approaches.» *J Build Rehabi*, vol. 10, p. 120, 2025.
- [24] K. M. N. T. P. O. Jourdan N, «Numerical simulation of hydrodynamics in wet cooling tower packings.» *Int J Refrig*, vol. 153, p. 194–204, 2023.
- [25] M. A. M. A. F. e. a. El-Zomor, «Failure analysis of bolts in deluge valve bonnet in cooling tower system in petrochemical plant.» *Sci Rep*, vol. 15, p. 14133, 2025.
- [26] A. L. E. Laptev, «A method for determining the heat and mass transfer efficiency in a film cooling tower with intensified fill packs.» *Thermophys. Aeromech*, vol. 31, p. 469–479, 2024.
- [27] N. P. H. M. L. M. K. A. Ruiz J, «Thermal performance and emissions analysis of a new cooling tower prototype.» *Appl Therm Eng*, vol. 206, p. 118065, 2022.
- [28] I. N. M. a. A. V. D. O. S. Dmitrieva, «Determination of the heat and mass transfer efficiency at the contact stage of a jet-film facility.» *J. Eng. Phys*, vol. 90, n° 3, p. 651–656, 2017.