

Artículo de investigación científica y tecnológica

Evaluación de los intercambiadores de calor aceite-agua con dispositivos magnéticos en una central termoeléctrica

Evaluation of oil-water heat exchangers with magnetic devices in a thermoelectric power plant

Josué Imbert González^{1*} , Dinnier Lestapi Medina² , Melek Campos Sofía³ ,
Geolbis Zamora Martínez⁴ 

1. Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial. Santiago de Cuba, Cuba.

2. Empresa Tecnomática. Santiago de Cuba, Cuba.

3. Universidad de Oriente, Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado, CNEA. Santiago de Cuba, Cuba.

4. Central Termoeléctrica Antonio Maceo. Santiago de Cuba, Cuba.

*Autor de correspondencia: imbert@uo.edu.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional](#)



Recibido: 30 de mayo de 2025

Aceptado: 15 de agosto de 2025

Publicado: 20 de agosto de 2025

Resumen

En el trabajo se realizó una evaluación comparativa del funcionamiento de los intercambiadores de calor aceite-agua, de una Central Termoeléctrica, a partir de la instalación de 32 dispositivos de acondicionamiento magnético en los cuatro intercambiadores de calor de coraza y tubos de la industria. La evaluación térmica de los intercambiadores de coraza y tubos se realizó a partir de los parámetros de funcionamiento del sistema por el método de la diferencia logarítmica de temperatura y el método de la efectividad. Como principal resultado luego de la aplicación de los dispositivos de acondicionamiento magnético se pudo determinar una elevación de la efectividad del sistema de

más de un 20 % respecto a su valor anterior a este cambio. El funcionamiento de los intercambiadores de calor con parámetros nominales de trabajo, desde la instalación de los dispositivos magnéticos en enero del año 2024, ha permitido su operación de manera segura y estable. Estos elementos han hecho posible alargar los períodos de mantenimiento contribuyendo a la eficiencia energética de la industria.

Palabras claves: intercambiador de calor aceite-agua, dispositivos magnéticos industriales, efectividad de un intercambiador de calor.

Abstract

In this study, we conducted a comparative evaluation of the performance of oil-water heat exchangers in a thermal power plant after the installation of 32 magnetic conditioning devices across the four shell and tube heat exchangers in operation. The thermal assessment of the shell and tube was based on system operating parameters, using the logarithmic temperature difference and effectiveness-NTU method. The key outcome after implementing these magnetic conditioning devices was more than 20% increase in

system effectiveness compare to pre-installation levels. The operation of heat exchangers with nominal working parameters, since the installation of magnetic devices in January 2024, has enabled their safe and stable operation. These elements have made it possible to extend maintenance periods, contributing to the energy efficiency of the industry.

Key words: heat exchanger oil-water, industrial magnetics devices, effectiveness of a heat exchanger.

Cómo citar este artículo, norma Vancouver:

Imbert González J, Lestapi Medina D, Campos Sofía M, Zamora Martínez G. Evaluación de los intercambiadores de calor aceite-agua con dispositivos magnéticos en una central termoeléctrica. Ingeniería Mecánica. 2025;28:e713. <https://goo.su/vr1Eul>

1. Introducción

Los intercambiadores de calor de tubo y coraza son los tipos de intercambiadores de calor más versátiles que existen en la actualidad [1]. Proporcionan una relación área de transferencia de calor/volumen y peso relativamente elevada, ofreciendo una gran flexibilidad para cumplir con casi cualquier requerimiento de servicio, mientras que en la actualidad se disponen de métodos de diseño confiables y factibles, así como también de talleres e instalaciones para efectuar su diseño y construcción con éxito. Pueden ser diseñados para manejar

corrientes de fluidos a elevadas presiones con relación al medioambiente, así como también fluidos con diferentes presiones entre sí [2].

Existe evidencia demostrada que el tratamiento magnético puede favorecer el funcionamiento de los intercambiadores de calor reduciendo la formación de incrustaciones con efectos positivos en la eficiencia térmica [3, 4] Estudios en esta dirección han demostrado que el campo magnético alternativo tiene mayor influencia en el coeficiente local de transferencia de calor que el unidireccional [5].

En la actualidad los estudios sobre este tema [6] han demostrado que determinados dispositivos de campo magnético axial evitan los depósitos de sales de calcio en las paredes de los tubos de intercambiadores de coraza y tubos permitiendo un funcionamiento más estable y favoreciendo el incremento de la transferencia de calor en estos equipos.

El empleo de los campos magnéticos para el incremento de la transferencia de calor se ha desarrollado mediante técnicas conjuntas a partir del uso de nanofluidos con resultados muy favorables de incremento del coeficiente de transferencia entre 5 % y 32 % a partir de campos que van desde 0,04 T (400 G) y 0,16 T (1600 G) [7]. Incrementos significativos de hasta un 15 % en la eficiencia térmica también han sido obtenidos mediante el uso de campos magnéticos no uniformes en combinación con el uso de nanofluidos en intercambiadores de tubo en tubo [8]

En general el empleo de los métodos de cálculo para evaluar intercambiadores de calor, debe estar definido en base a las características del mismo. Entre los métodos de evaluación es el de NTU-Efectividad uno de los más empleados [9-11], ya que brinda mayor cantidad de información a la hora tomar decisiones. Aunque existen investigadores que han demostrado que la efectividad de los intercambiadores de calor se incrementa con el incremento del número de unidades transferidas (*Number of Transfer Units*, NTU), mientras las pérdidas exergéticas disminuyen. Es por eso que recomiendan el empleo de la efectividad junto a la determinación de las perdidas exergéticas para obtener un resultado más objetivo [10]

En los estudios anteriormente citados se hace referencia a reportes experimentales en ambientes controlados, sin embargo, hay limitados reportes documentados de la evaluación de la eficiencia de los intercambiadores de calor bajo la influencia de dispositivos magnetizadores en instalaciones industriales en explotación. Esta investigación persigue evaluar el funcionamiento de los intercambiadores aceite-agua instalados en una Central Termoeléctrica de 100 MW, antes (STM) y después (CTM) de la ubicación de dispositivos magnéticos. Luego de la aplicación de los dispositivos de acondicionamiento magnético se pudo determinar una elevación de la efectividad del sistema de más de un 20 % respecto a su valor anterior a este cambio.

2. Métodos y Materiales

Los intercambiadores de calor aceite-agua, en la Central Termoeléctrica objeto de estudio, se encuentran ubicados verticalmente, dispuestos uno a continuación del otro en un arreglo de cuatro (4). El agua de circulación le entra por la parte inferior, realizando cuatro (4) pasos por la parte de los tubos y saliendo por la parte inferior del equipo. La entrada del aceite a los intercambiadores se efectúa por la parte superior de los mismos, efectuando diecinueve (19) cambios de dirección por el lado de la carcasa, debido a los deflectores dispuestos en la estructura, figura 1. La salida del aceite se realiza por la parte inferior del equipo, completando así el proceso de intercambio de calor en el equipo.



Fig. 1. Haz de tubos internos del intercambiador de calor donde se observan los deflectores del lado del aceite.
Fuente: autores

Estos intercambiadores de calor tienen como función principal mantener la temperatura del aceite en el sistema de lubricación de la turbina de vapor (Turbo 32) dentro de un rango óptimo para su correcto funcionamiento, lo cual además de proteger los componentes de la maquinaria contra el desgaste y daños causados por el calor excesivo, contribuye a prolongar la vida útil del aceite al prevenir el sobrecalentamiento y la degradación prematura. Al mismo tiempo, un adecuado funcionamiento de estos intercambiadores de calor mejora la eficiencia y el rendimiento del sistema de lubricación y de transmisión, con mayor seguridad operativa.

En la Central Termoeléctrica fueron ubicados treinta y dos (32) dispositivos magnéticos en enero del año 2024, en la línea de agua a la entrada de los intercambiadores de calor, figura 2.



Fig. 2. Ubicación de los dispositivos magnéticos a la entrada de agua en los Intercambiadores. Fuente: autores

Esta ubicación de los dispositivos magnéticos se realizó en la tubería de 152,4 mm (6 pulgadas) de diámetro a la entrada del agua de circulación con un arreglo de ocho (8) dispositivos en cada uno de los tubos del sistema, de manera que el campo magnético interactúa con todo el seno del fluido.

Los dispositivos magnéticos empleados son dispositivos para el tratamiento magnético del agua en tuberías magnéticas y no magnéticas de diámetro desde 50,8 mm (2 pulgadas) hasta 152,4 mm (6 pulgadas) fueron desarrollados en el laboratorio de caracterizaciones magnéticas del Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado (CNEA) de la Universidad de Oriente en Santiago de Cuba. Estos dispositivos, marca NOVAMAG® formados por imanes de Neodimio, fueron patentados por la Oficina Cubana de Propiedad Industrial en el año 2024 y tienen una intensidad de campo superficial de 0,25 T (2500 G).

2.1. Parámetros seleccionados para la evaluación

Para la evaluación del Intercambiador de calor se utilizaron los siguientes parámetros:

- 1.Temperatura de entrada del agua, t_{ci} , (°C).
- 2.Temperatura de salida del agua, t_{co} (°C).
- 3.Temperatura de entrada del aceite, T_{hi} . (°C).
- 4.Temperatura de salida del aceite, T_{ho} . (°C).

El registro de los datos se realizó a partir de los instrumentos Pt-100 ubicados en la propia instalación. El intervalo de tiempo de trabajo evaluado fue desde el año 2018 hasta el año 2025, con el objetivo de valorar mediciones antes y después de la instalación de los dispositivos magnéticos. Los días que fueron recogidos los datos fueron aquellos que no hubo interrupción del funcionamiento estable en el sistema.

A partir de estos valores, se realizó la determinación comparativa de los parámetros de efectividad (ε), unidades térmicas transferidas (NTU) y el comportamiento del coeficiente global de transferencia de calor (U).

2.2. Método de la diferencia media logarítmica de temperatura

El método determina la variación de temperatura logarítmica (*Logarithmic Mean Temperature Difference*, LMTD). La variación de temperatura que existe entre los fluidos cambia durante el flujo a través del equipo. Para la determinación de este parámetro suele ser utilizada en la siguiente ecuación (1):

$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (1)$$

La obtención de los valores de diferencia de temperaturas depende del flujo de los fluidos, de la siguiente manera. Para fluidos circulando en paralelo, son empleadas las ecuaciones (2) y (3):

$$\Delta T_1 = T_{ho} - T_{ci} \quad (2)$$

$$\Delta T_2 = T_{ho} - T_{co} \quad (3)$$

Para fluidos circulando en contraflujo, son empleadas las ecuaciones (4) y (5):

$$\Delta T_1 = T_{hi} - T_{ci} \quad (4)$$

$$\Delta T_2 = T_{hi} - T_{co} \quad (5)$$

Dónde:

T_{ho} : temperatura de salida del fluido frio [°C]

T_{hi} : temperatura de entrada del fluido frio [°C]

T_{ci} : temperatura de entrada del fluido caliente [°C]

T_{co} : temperatura de salida del fluido caliente [°C]

Para la determinación del coeficiente global de transferencia de calor (U) es posible despejar a partir de la ecuación de Newton para la transferencia de calor [12], quedando la ecuación (6):

$$U = \frac{Q}{A_s LMTD} \quad (6)$$

Dónde:

Q : razón de transferencia de calor [$J s^{-1}$]

U : coeficiente global de transferencia de calor [$W m^{-2} K^{-1}$]

A_s : superficie de transferencia de calor [m^2]

$LMTD$: diferencia logarítmica de temperatura [$^{\circ}C$]

F : Factor de corrección

Factor de corrección

Dentro del estudio de equipos de intercambio de calor de tubo y coraza es necesario el empleo de un factor de corrección (F). Este factor una medida de desviación de la variación de la temperatura y va a depender de la disposición de los elementos mecánicos del equipo, así como también de las temperaturas de entrada y salida de los fluidos que interactúan en el sistema. Para los intercambiadores de calor de tubo y coraza el factor de modificación (F) suele estar por debajo de la unidad (1). En el análisis de este trabajo este coeficiente fue tomado de una metodología ampliamente utilizada [12].

2.3. Método de Efectividad-NTU

El rendimiento de un intercambiador de calor se ve notablemente afectado debido a la conducción de calor de manera longitudinal o axial a través de las paredes. El método Efectividad-NTU es un parámetro adimensional que puede ser implementado para evaluar el coeficiente de transferencia de calor y la capacidad térmica de un intercambiador de calor y puede ser calculada de la siguiente manera, ecuación (7) [12]:

$$NTU = \frac{UA_s}{c_{min}} \quad (7)$$

Dónde:

U : coeficiente total de transferencia de calor [$W m^2 K^{-1}$].

A_s : superficie de transferencia de calor [m^2].

c_{min} : capacidad calorífica mínima específica [$J s^{-1} K$]

Relación de Capacidad

La relación de capacidad o también conocida como relación de capacidad calorífica total, representa un número adimensional, el cual permite realizar el cálculo de la efectividad a través de las capacidades caloríficas de los fluidos de alta y baja temperatura, y su valor se calcula mediante la ecuación (8):

$$C_r = \frac{c_{min}}{c_{max}} \quad (8)$$

Dónde C_{min} y C_{max} representan la capacidad mínima y máxima de los fluidos fríos y calientes que interactúan en el proceso de intercambio de calor, respectivamente, y sus valores son calculados en base a las ecuaciones (9) y (10):

$$C_h = m_h * C_{ph} \quad (9)$$

$$C_c = m_c * C_{pc} \quad (10)$$

Si: $C_c > C_h$ entonces $C_c = C_{max}$, sino $C_c = C_{min}$

Dónde:

m : flujo másico [$kg s^{-1}$].

C_p : calor específico [$J kg^{-1} K^{-1}$]

c : correspondiente al fluido frío

h : correspondiente al fluido caliente

Efectividad de un intercambiador de calor de coraza y tubo

La efectividad de un equipo de intercambio de calor se define mediante la división de la energía calorífica real transferida y el calor teórico máximo que se podría transferir, y se representa con la ecuación (11):

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}} \quad (11)$$

Dónde:

Q_{max} : razón máxima de la transmisión de calor $J s^{-1}$

El valor teórico máximo de calor que se podría transferir en el proceso del intercambiador de calor puede ser obtenido mediante la ecuación (12):

$$Q_{max} = C_{min} * (T_{hi} - t_{ci}) \quad (12)$$

Debido a que la efectividad de un intercambiador de calor compara la velocidad de transferencia térmica real, que es la absorbida por el fluido que se calienta, con la velocidad de transferencia térmica máxima que podría transmitirse, es necesario considerar dos casos para seleccionar el valor mínimo de capacidad (C_{min}), tomando en cuenta si el fluido con mayor o menor temperatura es el que posee menor capacidad calorífica. Este análisis lo realiza mediante la aplicación de las siguientes ecuaciones:

Si $C_{min} = C_c$, ecuación (13):

$$\varepsilon = \frac{t_{co} - t_{ci}}{T_{hi} - t_{ci}} \quad (13)$$

Si $C_{min} = C_h$, ecuación (14):

$$\varepsilon = \frac{T_{hi} - T_{ho}}{T_{hi} - t_{ci}} \quad (14)$$

Donde

C_c : capacidad calorífica del fluido frio [$J s^{-1} K^{-1}$]

C_h : capacidad calorífica del fluido caliente [$J s^{-1} K^{-1}$]

i : referente a la entrada

o : referente a la salida

3. Resultados

Para la evaluación de los resultados sobre la base de la implementación de dispositivos magnéticos instalados en los intercambiadores de calor de coraza y tubos, se llevará a cabo el análisis con el método de Efectividad – NTU.

3.1. Determinación del Coeficiente Global de Transferencia de Calor (U)

El coeficiente global de transferencia de calor, es un parámetro que engloba la resistencia total al flujo de calor a través de una barrera compuesta por múltiples componentes, como las paredes de un intercambiador de calor o una ventana. Se utiliza para describir la facilidad con que el calor se transfiere a través de un sistema compuesto por materiales y superficies de contacto. Este coeficiente también tiene en cuenta la resistencia a la convección por dentro de los tubos y por el lado de la coraza.

A continuación, se representa, en la figura 3, el comportamiento del Coeficiente Global de Transferencia de Calor para el proceso de intercambio, antes (STM) y después de la instalación de los dispositivos magnéticos (CTM).

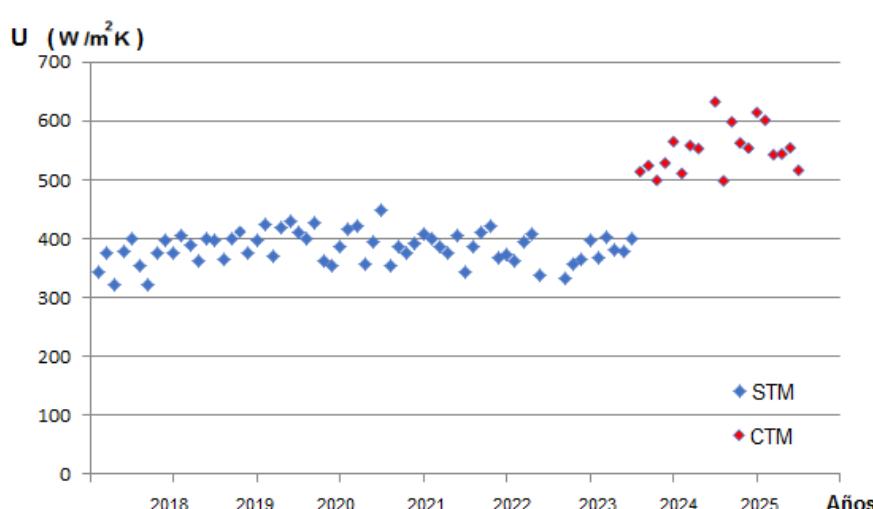


Fig. 3. Comportamiento del Coeficiente Global de Transferencia de Calor. Fuente: autores

En la figura anterior se describe el comportamiento del Coeficiente Global de Transferencia de Calor para un intercambiador de calor con fluidos de agua – aceite en función del tiempo. Se puede apreciar que este coeficiente experimentó cambios en sus parámetros al incorporarse tecnología magnética en la entrada de agua, a partir del año 2024. El incremento del coeficiente global es de un 43,2 % respecto al valor obtenido antes de emplear los dispositivos magnéticos.

3.2. Determinación del Número de Unidades de Transferencia

El número de unidades de transferencia (*Number of Transfer Units*, NTU) es un parámetro adimensional utilizado en el diseño y análisis de intercambiadores de calor, físicamente el NTU proporciona una medida de la capacidad relativa de un intercambiador de calor para transferir calor, comparada con la máxima capacidad teórica de transferencia de calor.

A continuación, se representa, en la figura 4, el comportamiento del Número de Unidades de Transferencia respecto al coeficiente Global de transferencia de calor, para el proceso de intercambio antes y después de la instalación de los dispositivos magnéticos.

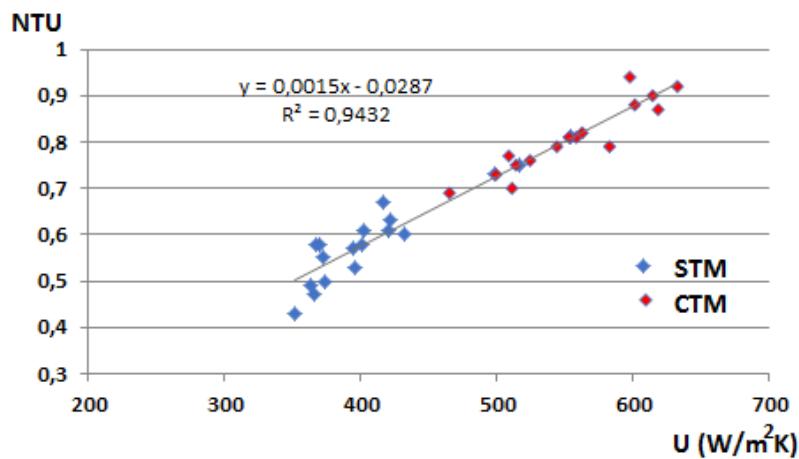


Fig.4. Comportamiento del Número de Unidades de Transferencia respecto al coeficiente Global. Fuente: autores

En el gráfico se presentan los valores obtenidos para el proceso de intercambio antes y después de la instalación de los dispositivos magnéticos, durante el año 2023 y el año 2024, para observar el impacto de los dispositivos magnéticos en el proceso.

Se puede apreciar en la gráfica que existe una variación del NTU en el intervalo del año 2023-2024, denotando que la presencia de los dispositivos magnéticos tiene influencia directa en el proceso de intercambio de calor. Se obtiene además una correlación lineal con una fuerte correlación ($R = 0,94$), que puede permitir predecir con buena aproximación los valores correspondientes entre ambos coeficientes.

3.3. Determinación de la Efectividad

La efectividad de un intercambiador de calor es una medida de la eficiencia con la que el intercambiador transfiere calor entre los fluidos. Se define como la relación entre la cantidad real de calor transferido y la cantidad máxima de calor que podría ser transferida bajo ciertas condiciones ideales.

Físicamente, la efectividad de un intercambiador de calor nos dice cuán cerca está el intercambiador de alcanzar la transferencia de calor máxima teóricamente posible. A continuación, se representa (figura 5) el comportamiento de los valores medios de la efectividad evaluada para el proceso de intercambio antes y después de la instalación de los dispositivos magnéticos. La gráfica muestra el impacto del cambio tecnológico en este coeficiente entre el año 2023 y el 2024.

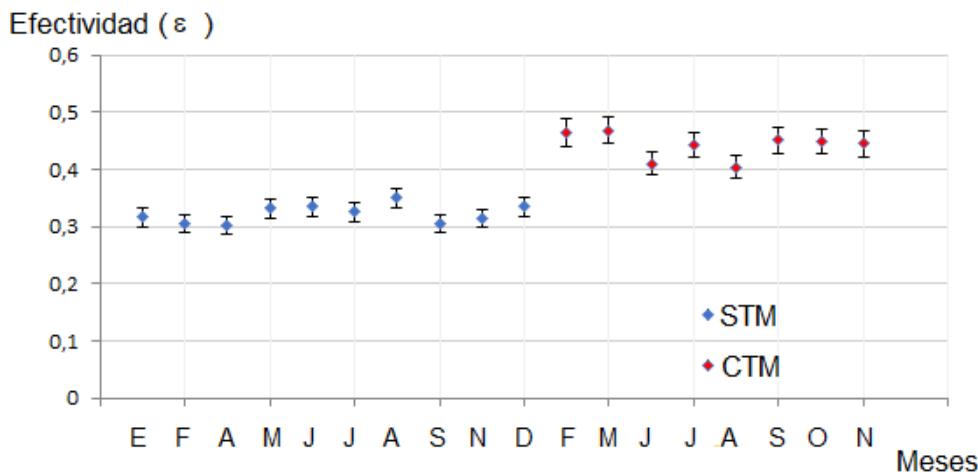


Fig. 5. Comportamiento de la Efectividad del intercambiador de calor en el año 2023 y 2024. Fuente: autores

En la gráfica se aprecia que los valores medios graficados de la efectividad de los intercambiadores de calor tienen un incremento a partir de la colocación de los dispositivos magnéticos. Este incremento fue mantenido durante el tiempo de medición en el tiempo objeto de análisis. El incremento en su valor medio obtenido de la efectividad fue de 27,1 % en comparación con los valores de la efectividad del intercambiador sin el tratamiento magnético.

3.4 Valoración tecnológica

De acuerdo con datos históricos de la propia Central Termoeléctrica, es requerido dar tres mantenimientos cada año a los equipos enfriadores de aceite. A partir de la puesta en marcha de los dispositivos magnéticos en enero del año 2024 no se realizó ninguna parada por esta causa, ya que el sistema operaba dentro de los parámetros nominales para su explotación estable y segura.

Cada proceso de mantenimiento de este tipo, en la central termoeléctrica está planificado para desarrollarse durante 5 días. Este elemento evidencia que la viabilidad tecnológica con una relevancia económica muy favorable, ya que no solo permitió disminuir los tiempos de parada del sistema, sino el ahorro de importantes insumos requeridos para los procesos de mantenimiento de estos equipos.

4. Discusión

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede apreciar una elevación del coeficiente global de transferencia de calor. Esto está sustentado en que justamente la incorporación de los dispositivos magnéticos impide el depósito de sales en el interior de los tubos del intercambiador de calor, tal y como otros investigadores ya han demostrado [13,14].

Se conoce que en la mayoría de los intercambiadores no existe una correspondencia lineal entre el coeficiente global (U) y el NTU. La correspondencia depende fuertemente de la geometría del intercambiador de calor IC y de la relación de capacidades térmicas (Cr). La correspondencia lineal obtenida entre el coeficiente global de transferencia de calor (U) y las unidades térmicas transferidas (NTU), confirma que el método NTU-efectividad se está empleando de manera adecuada bajo condiciones constantes de flujo, donde NTU actúa como un indicador directo y proporcional del rendimiento térmico (U). Esta correspondencia se mantuvo incluso cuando se empleó un dispositivo magnético que impide la formación de incrustaciones.

Al emplear el dispositivo magnético en el proceso de intercambio se observa un aumento proporcional en el NTU, es decir U se duplica por la limpieza y el NTU obtenido también se duplica, confirmando que el factor limitante en el proceso de intercambio era la resistencia térmica de las incrustaciones. La linealidad obtenida confirma que la mejora se debe únicamente a la reducción de las resistencias térmicas, no a un cambio en la configuración física del equipo.

El incremento medio obtenido en el coeficiente global de trasferencia de calor estuvo en el intervalo entre 35 % y 51 %. Al comparar los resultados de este estudio con otras investigaciones que han estudiado esta influencia [9-11] donde se han obtenido niveles de incremento del coeficiente global entre el 15 % y el 30 %, entonces se puede valorar estos resultados como relevantes.

El incremento en un 27,1 % de la efectividad del intercambiador de calor tras el uso de los dispositivos magnéticos, es un resultado significativo que apunta directamente a la mitigación efectiva de las incrustaciones, debido a la reducción drástica de la resistencia térmica total del sistema, causada primariamente por la acción del dispositivo magnético. Este incremento se encuentra en el intervalo de lo que han obtenido otros investigadores [5, 7, 15] que reportan que el uso de dispositivos magnéticos de manera conjunta con nanofluidos alcanza crecimientos en el intervalo entre 5 y 31 %.

Los resultados indican que el sistema magnético no solo está previniendo las incrustaciones sino que está revirtiendo activamente una condición de incrustación previa considerable que el intercambiador. Esto indica que el equipo estaba operando en un régimen donde la resistencia de incrustación era el principal factor limitante a la trasferencia de calor.

Aunque la remoción de incrustaciones es el efecto primario, los campos magnéticos aplicados pueden influir en el flujo cerca de las paredes, fenómeno conocido en el campo científico como magnetohidrodinámica – MHD o efectos magnéticos en fluidos no magnéticos. El campo magnético puede influir en la turbulencia o la capa límite viscosa, promoviendo una mejor mezcla del fluido caliente cerca de la superficie, elevando ligeramente, los coeficientes convectivos y mejorando la convección. Este efecto secundario se suma a la ganancia obtenida por la reducción de la resistencia térmica, contribuyendo al aumento total de la efectividad.

Los resultados obtenidos denotan que el intercambiador estaba operando con una pérdida de rendimiento significativa debido a las elevadas incrustaciones. El empleo de estos dispositivos permitió recuperar más de una cuarta parte de la efectividad, lo cual es una mejora sustancial en la eficiencia energética y la capacidad del proceso.

Estos resultados representan un testimonio importante de la efectividad de la aplicación del campo magnético para prevenir la adhesión o promover la remoción activa de depósitos.

Los resultados medios obtenidos en la obtención del coeficiente global de transferencia de calor (U), las Unidades térmicas transferidas (NTU) y la efectividad de los intercambiadores (ε) se obtuvieron a partir de las

mediciones desarrolladas en la industria. Los resultados consideran las incertidumbres de las mediciones desarrolladas con instrumentos instalados en la industria, las mediciones necesarias para obtener el área de transferencia de calor y la fluctuación de la temperatura ambiente que puede tener incidencia en las mediciones y propiedades de las sustancias que fluyen en el sistema. Los valores de incertidumbre de los resultados están entre el 8 % y el 11 % lo cual es superior, respecto a otros estudios de similar naturaleza [13, 14] que han obtenido incertidumbres en el orden del 5 % y el 9 %. A pesar de ser una de las limitaciones de este estudio, los autores consideran que estos resultados pueden considerarse como aceptables, dada la naturaleza de este estudio.

Conclusiones

La evaluación de los intercambiadores de calor permitió, después de la aplicación de los dispositivos de acondicionamiento magnético, una elevación de la efectividad del sistema de más de un 20 % respecto a su valor anterior a este cambio.

Debido al acondicionamiento magnético instalado en los enfriadores de aceite se disminuyó el uso de productos químicos necesarios para la limpieza de los intercambiadores de calor, estos son altamente contaminantes del medio ambiente.

Referencias

1. Gugulothu R, Sanke N. Experimental investigation of heat transfer characteristics for a shell and tube heat exchanger. *Energy Harvesting and Systems*. 2024;11(1):20220147. <https://doi.org/10.1515/ehs-2022-0147> 2022; 23:9-10:515–547. <https://doi.org/10.1080/14685248.2022.2134571>
2. Henrique-Saldanha W, Ponce Arrieta FR, Soares GL. State of the art of research on optimization of shell and tube heat exchanger by methods of evolutionary Computation. *Archives of computational Methods in Engineering*. 2021;28:2761–2783. <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09476-4>
3. Yang J, Yang X, Wang J, Chin HH, Sundén B. Review on Thermal Performance of Nanofluids With and Without Magnetic Fields in Heat Exchange Devices. *Front. Energy Res.* 2022;10:822776. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.822776>
4. Peng Y, Xu X, Liang Y. Influence of an Axial-Electromagnetic Field Treatment Device with a Solenoid Structure on Crystallization Fouling on the Tube Side of a Shell-and-Tube Heat Exchanger. *Entropy*. 2023;25(7):962. <https://doi.org/10.3390/e25070962>
5. Zhang X, Zhnag Y. Experimental study on enhanced heat transfer and flow performance of magnetic nanofluids under alternating magnetic field. *International Journal of Thermal Science*. 2022;164:106897. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.106897>
6. Azadi S, Abjadi A, Vahdat Azad A, Ahmadi Danesh Ashtiani H, Afshar H. Enhancement of heat transfer in heat sink under the effect of a magnetic field and an impingement jet. *Front. Mech. Eng.* 2023;9:1266729. <https://doi.org/10.3389/fmech.2023.1266729>.
7. Azizi Y, Bahramkhoo M, Kazemi A. Influence of non-uniform magnetic field on the thermal efficiency hydrodynamic characteristics of nanofluid in double pipe heat exchanger, *Scientific Reports*. 2023;13:407. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26285-w>
8. Turgut E, Yardımcı U. Detailed evaluation of a heat exchanger in terms of effectiveness and second law. *Journal of Turbulence*. 2022;23:9-10:515–547. <https://doi.org/10.1080/14685248.2022.2134571>
9. Marzouk SA, Abou Al-Sood MM, Emad MS, Younes MM, El-Fakhary MKA. Comprehensive review of methods of heat transfer enhancement in shell and tube heat exchangers. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2023;148:7539–7578. <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12265-3>
10. Alteneiji M, Mohamed I, Ali H, Khan KA, Abu Al-Rub RK. Heat transfer effectiveness characteristics maps for additively manufactured TPMS compact heat exchangers. *Energy Storage and Saving*. 2022;13:153–161. <https://doi.org/10.1016/j.eness.2022.04.005>
11. Shu-Rong Y, Moria H, Pourhedayat S, Hashemian M, Assadi S, Dizaji SH, Jermstiparsert KA critique of effectiveness concept for heat exchangers; theoretical-experimental study. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020;159:120–160. <https://doi.org/10.1016/J.IJHEATMASSTRANSFER.2020.120160>
12. Çengel YA, Ghajar AJ. Heat and mass Transfer: Fundamentals and Applications. 5th ed. New York, USA: McGraw-Hill Education; 2015.
13. Amer L, Ouhenia S, Chateigner D, Gascoin S, Belabbas I. Effect of magnetics field on the crystallization and deposition of calcium carbonate. *Applied Physics A*. 2021;127:716. <https://doi.org/10.1007/s00339-021-04860-8>
14. Liang Y, Xu Y, Jia M, Wang J. Experimental study on the influence of an alternating magnetic field on the CaCO₃ fouling of a heat transfer surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022;183:122–156. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122156>
15. Yu S-P, Lue YF, Teng TP, Hsieh HK, Huang CC. Enhanced Heat Transfer Performance of the Tube Heat Exchangers Using Carbon-Based Nanofluids. *Applied Sciences*. 2021;11(17):8139. <https://doi.org/10.3390/app11178139>

Editores:

Alberto Julio Rodríguez Piñeiro, Vladimir Tomás González Fernández
Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría

Conflictos de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

Contribución de los autores**Josué Imbert González**

Participó en la concepción, diseño de la investigación y en la búsqueda bibliográfica. Realizó contribuciones en el análisis e interpretación de los resultados. Trabajó en la revisión crítica de su contenido, redacción y aprobación del informe final.

Dinier Lestapi Medina

Trabajó en la búsqueda bibliográfica, recolección de los datos, análisis de los resultados y en la revisión crítica, redacción y aprobación del informe final.

Melek Campos Sofia

Participó en la concepción y diseño de la investigación. Realizó contribuciones en el análisis e interpretación de los resultados. En la revisión crítica del contenido, redacción y aprobación del informe final.

Geolbis Zamora Martínez

Trabajó en la concepción de la investigación, en la recopilación de los datos experimentales e interpretación de los resultados. Facilitó la intervención de los investigadores en la industria. Participó en la revisión crítica del contenido, redacción y aprobación del trabajo final.