Influencia del ensuciamiento sobre la transferencia de calor y su relación con el mantenimiento predictivo en intercambiadores de calor

Fecha de recepción: 26 septiembre 2026 Fecha de corrección:20 octubre 2026

Luisa Rodríguez Cabrera, Mary Toj Aspuac, Jonatan Baeza Alvarado, Julio Orozco Orozco, Estefani Ovalle Menchú[1]

RESUMEN

El presente estudio analiza el efecto del fenómeno de ensuciamiento (fouling) sobre el desempeño térmico de un intercambiador de calor de tubos concéntricos utilizado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad de San Carlos de Guatemala. A partir de datos experimentales de temperaturas y flujos másicos de agua y aceite, se determinó la tasa de transferencia de calor y el coeficiente global de transferencia de calor en condiciones limpias. Posteriormente, se evaluó el impacto de distintos espesores teóricos de incrustación mediante el cálculo del factor de ensuciamiento, con el propósito de analizar su influencia sobre la eficiencia térmica y el rendimiento operativo del equipo.

Los resultados evidencian que el incremento del espesor de incrustación genera una disminución progresiva en la capacidad de transferencia de calor del intercambiador. El coeficiente global de transferencia de calor se redujo de 63.77 W/m²·K a 58.20 W/m²·K al aumentar el espesor de incrustación hasta 1.5 mm. Asimismo, la eficiencia térmica disminuyó de 100 % a 91.26 %, mientras que la tasa de transferencia de calor descendió de 955.73 W a 872.29 W. Estos resultados demuestran que el ensuciamiento constituye una resistencia térmica adicional que limita el flujo de calor entre los fluidos y reduce gradualmente el desempeño del sistema. Se concluye que el monitoreo continuo de variables como el coeficiente global de transferencia de calor, la eficiencia térmica y la tasa de transferencia de calor, junto con la implementación de estrategias de mantenimiento predictivo, son fundamentales para preservar la eficiencia operativa, reducir pérdidas energéticas y prolongar la vida útil del intercambiador de calor.

Palabras clave: Ensuciamiento, intercambiador de calor, transferencia de calor, mantenimiento predictivo, eficiencia térmica.

ABSTRACT

This study analyzes the effect of fouling on the thermal performance of a concentric-tube heat exchanger used in the Unit Operations Laboratory of the University of San Carlos of Guatemala. Based on experimental measurements of temperatures and mass flow rates of water and oil, the heat transfer rate and the overall heat transfer coefficient under clean operating conditions were determined. Different theoretical fouling thicknesses were then evaluated through the calculation of fouling factors in order to analyze their impact on thermal efficiency and operational performance.

The results show that increasing fouling thickness causes a progressive reduction in the heat transfer capacity of the exchanger. The overall heat transfer coefficient decreased from 63.77 W/m²·K to 58.20 W/m²·K when the fouling thickness reached 1.5 mm. Likewise, thermal efficiency decreased from 100% to 91.26%, while the heat transfer rate dropped from 955.73 W to 872.29 W. These findings demonstrate that fouling acts as an additional thermal resistance that restricts heat flow between fluids and gradually reduces system performance. It is concluded that continuous monitoring of parameters such as the overall

[1] Estudiantes de último año de la carrera de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Email:*3675036620101@ingenieria.usac.edu.gt*, ,2779074030401@ingenieria.usac.edu.gt,3214987470502@ingenieria.usac.edu.gt,3301874651201@ingenieria.usac.edu.gt *3749403470101@ingenieria.usac.edu.gt*

Fecha de recepción: 26 septiembre 2026 Fecha de corrección:20 octubre 2026

heat transfer coefficient, thermal efficiency, and heat transfer rate, together with the implementation of predictive maintenance strategies, is essential to preserve operational efficiency, reduce energy losses, and extend the service life of heat exchangers.

Keywords: Fouling, heat exchanger, heat transfer, predictive maintenance, thermal efficiency.

INTRODUCCIÓN

Los intercambiadores de calor son equipos fundamentales en procesos industriales. Este equipo permite el transferir energía térmica entre dos fluidos que se encuentran a distintas temperaturas y están separados dentro del equipo por una superficie sólida. La transferencia de energía ocurre mediante los mecanismos de convección en cada corriente y conducción a través de la pared que separa los fluidos. (Cengel, 2007)

El intercambiador de calor requiere mantenimiento periódico, ya que, debido al uso continuo, las superficies de transferencia pueden acumular depósitos sólidos, biológicos o químicos. Esta acumulación, conocida como ensuciamiento o fouling, incrementa la resistencia térmica del sistema, reduce la transferencia de calor y afecta negativamente la eficiencia energética del proceso. (Lestina, 2018)

En el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad de San Carlos de Guatemala se utiliza un intercambiador de calor de tubos concéntricos para estudiar fenómenos de transferencia de calor, este sistema constituye una de las prácticas más importantes dentro del curso de Laboratorio de Ingeniería Química.

Con base en lo expuesto, en este artículo se busca demostrar cómo el fenómeno de ensuciamiento puede afectar al desempeño del intercambiador de calor, así como el impacto que tiene el grosor de estos depósitos formados en el equipo utilizado en laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Asimismo, se busca resaltar la importancia del mantenimiento de este equipo.

MÉTODOS, PROCEDIMIENTOS Y MATERIALES

A continuación, se presentan las mediciones experimentales del flujo másico del agua que circula por el espacio anular y del flujo másico del aceite que fluye por el tubo interior, así como las temperaturas de entrada y salida de ambos fluidos en el intercambiador de calor de tubos concéntricos utilizado para el enfriamiento del aceite.

Tabla 1. Datos de temperaturas del flujo de agua.

Corridas	Flujo másico (kg/s)	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de salida (°C)
1	0.9555	24.66	25.66
2	0.9555	24.66	25.66
3	0.9555	25.00	26.00

Nota: Datos tomados del laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad San Carlos de Guatemala (2026).

Tabla 2. Datos de temperaturas del flujo del aceite.

Corridas	Flujo másico (kg/s)	Temperatura de entrada (°C)	Temperatura de salida (°C)
1	0.9555	59.33	40.66
2	0.9555	53.66	43.66
3	0.9555	52.66	44.00

Nota: Datos tomados del laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad San Carlos de Guatemala (2026).

Fecha de recepción: 26 septiembre 2026 Fecha de corrección:20 octubre 2026

Dadas las mediciones de las variables operativas seleccionadas, se procede al cálculo de la tasa de transferencia de calor, el coeficiente global de transferencia y los factores de incrustación.

1. Cálculo de la tasa de transferencia de calor.

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p \Delta \quad (1)$$

Tabla 3. Tasa de transferencia de calor.

Temperatura media (K)	Capacidad calorífica (J/kg k)	Q (W)
298.32	999.78	955.35
298.32	999.78	955.35
298.65	999.79	955.36

Nota: Elaboración propia (2026).

2. Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor limpio.

$$\dot{Q} = UA\Delta T_{LM} \quad (2)$$

Tabla 4. Coeficiente global de transferencia de calor.

As (m^2)	ΔT_1 (K)	ΔT_2 (K)	ΔT_{LM} (K)	U (W/ m^2 K)
0.6462	33.67	16	23.74	62.25
	28.00	19	23.20	63.69
	26.67	19	22.61	65.36
Promedio de U				63.77

Nota: Elaboración propia (2026).

3. Cálculo de los factores de incrustación.

Para el análisis se asume una conductividad térmica de la incrustación de 1 W/m K, valor representativo de incrustaciones minerales de baja conductividad como el carbonato de calcio y de magnesio, normalmente presentes en el agua.

Para observar el efecto en del ensuciamiento en la transferencia de calor se proponen distintos espesores de incrustación:

$$R_f = \frac{\delta}{k_f} \quad (3)$$

Tabla 5. Espesor de incrustación y factor de incrustación.

δ (m)	k_f (W/m K)	R_f (m^2 K/W)
0	1	0
0.0002	1	0.0002
0.0005	1	0.0005
0.0010	1	0.0010
0.0015	1	0.0015

Nota: Elaboración propia (2026).

4. Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor a distintos espesores de incrustación.

$$U_f = \frac{1}{\frac{1}{U_c} + R_f} \quad (4)$$

Tabla 6. Coeficiente global de transferencia de calor en función del factor de incrustación.

R_f (m^2 K/W)	U_f (W/ m^2 K)	η (%)
0	63.77	100.0
0.0002	62.96	98.74
0.0005	61.80	96.90
0.0010	59.94	94.00
0.0015	58.20	91.26

Nota: Elaboración propia (2026).

Fecha de recepción: 26 septiembre 2026 Fecha de corrección:20 octubre 2026

5. Cálculo de la tasa de transferencia de calor a distintos niveles de ensuciamiento.

Tabla 7. Tasa de calor transferido a distintos niveles de ensuciamiento.

δ (m)	U_f (W/ m^2 K)	Q (W)
0	63.77	955.73
0.0002	62.96	943.70
0.0005	61.80	926.20
0.0010	59.94	898.44
0.0015	58.20	872.29

Nota: Elaboración propia (2026).

INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA

En los intercambiadores de calor, la transferencia de calor ocurre mediante dos mecanismos: convección y conducción.

Para que ocurra transferencia de calor por convección, son necesarios dos factores: la presencia de un medio material y el fluido debe tener movimiento masivo. Debido a que la transferencia de calor por convección pone en contacto las regiones más calientes con las más frías del fluido gracias al movimiento de este, por lo cual, a mayor velocidad del fluido, mayor es la velocidad de transferencia de calor. (Cengel, 2007)

Por otro lado, la conducción Es la trasferencia de calor que se da a través de paredes sólidas. Esta transferencia es impulsada por un gradiente de temperatura en una dirección determinada. (Cengel, 2007)

Ambos mecanismos son de gran importancia en el análisis de intercambiadores de calor. En este caso, el artículo analiza un intercambiador de calor de tubos concéntricos, donde ambos mecanismos están presentes.

DETALLES DE LA EXPERIMENTACIÓN

La información utilizada en este estudio fue obtenida a partir de una práctica realizada en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad de San Carlos de Guatemala. El sistema empleado consistió en un intercambiador de calor de tubos concéntricos operado en régimen estacionario, utilizando agua como fluido de enfriamiento y aceite como fluido caliente.

Las incrustaciones en un intercambiador de calor, son acumulaciones de sólidos, biológicos y químicos que se forman sobre las superficies y pasos de flujo de los intercambiadores de calor. El ensuciamiento da como resultado una reducción de transferencia de energía térmica lo cual implica mayor gasto, pues, se requerirá más energía eléctrica para obtener el resultado deseado.

Es importante que existan estrategias preventivas y planes de limpieza para controlar el ensuciamiento. La limpieza debe ser hecha con frecuencia y para ello se debe tener en cuenta el diseño del intercambiador de calor y como poder acezar a las partes del equipo que se deben de limpiar.

Algunos de los métodos de limpieza son: El lavado mecánico, donde se usa agua a presión y cepillos. La limpieza química utiliza sustancias para disolver la suciedad e incrustaciones. Esta última puede ser usada tanto para los tubos interiores como para la coraza o espacio anular.

Durante la práctica se registraron las temperaturas de entrada y salida de ambos fluidos, así como los flujos másicos correspondientes. Los datos experimentales fueron utilizados para determinar la tasa de transferencia de calor y el coeficiente global de transferencia de calor en condiciones limpias. Posteriormente, mediante un análisis teórico, se evaluó el efecto de distintos niveles de incrustación sobre el desempeño térmico del intercambiador.

Fecha de recepción: 26 septiembre 2026 Fecha de corrección:20 octubre 2026

RESULTADOS

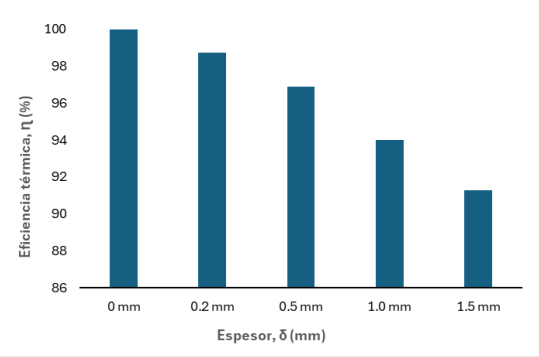
A continuación, se muestran los resultados de obtenidos para la eficiencia térmica y la tasa de transferencia de calor en función del espesor de incrustación.

Tabla 8. Eficiencia y tasa de transferencia de calor en función del espesor de incrustación.

δ (m)	η (%)	Q (W)
0	100.0	955.73
0.0002	98.74	943.70
0.0005	96.90	926.20
0.0010	94.00	898.44
0.0015	91.26	872.29

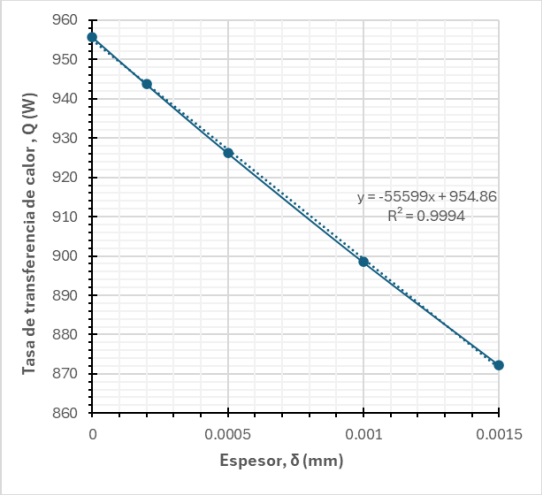
Nota: Elaboración propia (2026).

Gráfica 1. Eficiencia en función del nivel de ensuciamiento (espesor de incrustación).



Nota: Elaboración propia (2026).

Gráfica 2. Comportamiento de la tasa de transferencia de calor en función del espesor de incrustación.



Nota: Elaboración propia (2026).

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la Tabla 6 se refleja el comportamiento del coeficiente global de transferencia de calor (U_f) en relación con el factor de incrustación (R_f). Los resultados indican que a medida que aumenta el espesor de los depósitos sobre la superficie del intercambiador, el coeficiente global se convierte más bajo, desde 63.77 W/m²·K en las condiciones limpias hasta 58.20 W/m²·K cuando el espesor de la incrustación es de 0.0015 m. En esta disminución las incrustaciones introducen una resistencia térmica adicional que limita el flujo de calor, lo que impide que éste interactúe entre los fluidos. En condición de las afirmaciones de Cengel (2007) y Kern (1997), el ensuciamiento disminuye paulatinamente el rendimiento de transferencia de calor debido

Según la Grafica 1, la eficiencia térmica cambia según el grosor de las incrustaciones. Se observa una disminución donde la eficiencia cae de 100% respecto a las condiciones actuales hasta el 91.26% cuando el espesor aumenta hasta 1.5 mm. Aunque el descenso no es significativo para los espesores analizados, los hallazgos indican que cualquier capa de incrustación disminuye el rendimiento del dispositivo. Este comportamiento se alinea con las

Fecha de recepción: 26 septiembre 2026 Fecha de corrección:20 octubre 2026

observaciones de Ogbonnaya y Ajayi (2017), quienes dicen que las incrustaciones son una de las causas más frecuentes de desempeño reducido de intercambiadores de calor para uso industrial.

Otro punto dado es la Tabla 7 y la Gráfica 2, muestran la asociación entre el grosor de la incrustación y la tasa de transferencia de calor. Aunque el volumen de calor transferido disminuye desde 955.73 W hasta 872.29 W con mayor concentración de impurezas, esto es debido a que la capa formada por la suciedad aumenta la resistencia total del calor, lo que limita la cantidad de energía que puede fluir del aceite a la corriente de agua. Según Welty et al. (2008), este fenómeno muestra una degeneración graduable del rendimiento, lo que aumenta tanto el consumo de electricidad como el costo operativo cuando no se mantiene de manera adecuada.

En la Tabla 8 muestra el impacto de la contaminación externa sobre la performance de los intercambiadores de calor. Se observa que, con un espesor de incrustación que va desde cero hasta 0.0015 m, la eficiencia térmica se reduce de 100% hasta el 91.26%, mientras que la tasa de transferencia de calor se ve afectada de una cantidad de 955.73 W a 872.29 W. Estos datos muestran que el fouling afecta tanto la capacidad de transporte energético como la operatividad del equipo. Esto implica la necesidad de programar sistemas de seguimiento e inspección predeterminados para impedir el descenso de rendimiento durante el funcionamiento continuo.

El estudio indica la importancia del mantenimiento predictivo en los intercambiadores de calor. La inspección frecuente de valores como la constante global de transferencia de calor, la eficiencia térmica y el ritmo de transferencia de calor permitirá identificar con antelación el desarrollo de las acumulaciones para evitar su impacto en la funcionalidad del sistema. En esta línea, Penha, Hines y Upadhayaya (2003) indican que el seguimiento constante de ciertos criterios mejorará la planificación de las acciones de limpieza y mantenimiento, minimizando las interrupciones no planeadas y ampliando así la duración de la vida de los componentes dados

Los resultados obtenidos demuestran que la capa de depósitos sobre la superficie de transferencia de calor representa una resistencia adicional para esta transferencia y hace que disminuya la razón de la misma en el intercambiador. (Cengel y Ghajar, 2011). La incrustación actúa como una resistencia por conductividad y, al tener una conductividad térmica baja, incrementa la resistencia al flujo de calor, reduciendo la eficiencia del intercambiador. En este caso, la incrustación se tomó como un depósito proveniente de la dureza del agua (compuestos de calcio y magnesio). Debido a la falta de datos experimentales sobre la formación de incrustaciones, se propusieron distintos espesores teóricos con el propósito de observar el comportamiento del intercambiador de calor ante diferentes niveles de ensuciamiento.

CONCLUSIONES

1. Con base a los resultados, el factor de ensuciamiento se cataloga como una variable crítica en el desempeño del intercambiador de calor, ya que actúa como una resistencia térmica que puede variar drásticamente el comportamiento de todo el sistema. transformándolo en un sistema deficiente en mediano plazo, lo que vuelve indispensable su monitoreo continuo dentro del esquema de mantenimiento predictivo.
2. A medida que el espesor de la incrustación aumenta en su nivel hasta 1.5mm, la capacidad del intercambiador de transferir energía disminuyó progresivamente. El fenómeno de ensuciamiento provoca una caída del 8.74% en el rendimiento y la transferencia de calor del sistema

Fecha de recepción: 26 septiembre 2026

Fecha de corrección:20 octubre 2026

en comparación con el equipo en condiciones actuales de operación, reduciendo su eficiencia global hasta un 91.26%.

3. El monitoreo periódico del coeficiente global de transferencia de calor, la eficiencia térmica y la tasa de transferencia de calor constituye una herramienta útil para implementar estrategias de mantenimiento predictivo. Estas variables pueden emplearse como indicadores del deterioro térmico del intercambiador, permitiendo programar limpiezas o inspecciones antes de que la acumulación de depósitos genere pérdidas energéticas significativas o afecte la continuidad operativa del proceso.

Bibliografía

Al-Haj Ibrahim, H. (2012). Fouling in Heat Exchangers. 3(1),57–96. *haIntech*:https://doi.org/10.5772/46462

Çengel, Y. A. (2007). Transferencia de calor y masa (3.ª ed.). McGraw-hIll

Greitzer, E. M., Spakovszky, Z. S., & Waitz, I. A. (2007). 16.4 Thermal resistance circuits. En 16.Unified: Thermodynamics and propulsion. Massachusetts Institute of Technology. https://web.mit.edu/16.unified/www/FALL/thermodynamics/notes/node118.html

Kern, D. Q. (1997). Procesos de transferencia de calor. Compañía Editorial Continental.

Kulaki, F.A. (Ed.). (2017). Handbook of thermal Science and engineering. Springer

McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriott, P. (2007). Operaciones unitarias en ingeniería química (7.ª ed.). McGraw-Hill.

Ogbonnaya, S., & Ajayi, Oluseyi. (2017). *Fouling Phenomenon and its effect on heat exchanger: A review. Frontiers in Heat and Mass Transfer.* 9(31), 1-12. DOI: 10.5098/hmt.9.31

Penha, R., Hines, J., & Upadhayaya, B. (2003). Monitoring and diagnosis of a heat exchanger using hybrid system modeling. MARCON 2003, Knoxvelle, TN, E.E.U.U.

Perry, R.H., & Green, D.W.(EDS). (2008). Perry´s Chemical Engineers´ Handbook. (8.ª ed.) McGraw-Hill.

Welty, J. R., Wicks, C. E., Wilson, R. E., & Rorrer, G. L. (2008). Fundamentals of momentum, heat, and mass transfer (5.ª ed.). John Wiley & Sons.