

## Evaluación de pérdidas de calor mediante procesamiento de imágenes termográficas 2D

### Evaluation of Heat Losses Using 2D Thermographic Image Processing

Julio L. Ramos Martínez<sup>1\*</sup> <https://orcid.org/0009-0007-0235-1698>

Yudith González-Díaz<sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0003-124-1146>

Harold Crespo Sario<sup>3</sup> <https://orcid.org/0000-0002-1826-582X>

David Cambara González<sup>4</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6476-4822>

<sup>1</sup>Facultad de ingeniería en Telecomunicaciones, Informática y Biomédica, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería Química y Agronomía, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba

<sup>3</sup>Sociedad HECHO EN ITALIA srl., Torino, Italia

<sup>4</sup>Agencia de Estudios Medioambientales, Grupo Empresarial GeoCuba Oriente Sur, Santiago de Cuba, Cuba

\*Autor para correspondencia: [julioramosmartinez28@gmail.com](mailto:julioramosmartinez28@gmail.com)

#### RESUMEN

La evaluación del rendimiento térmico es crucial para la gestión energética y el diagnóstico en la industria. Este artículo presenta un método innovador para cuantificar las pérdidas de calor por convección libre y radiación en sistemas industriales mediante termografía infrarroja (IRT), aplicado al tope de una columna de destilación en una destilería de ron. La principal contribución es un enfoque que calcula las pérdidas energéticas a partir de un análisis frecuencial optimizado de imágenes termográficas en dos dimensiones (2D). El método emplea el algoritmo multi-umbral avanzado de Otsu para el procesamiento digital de las imágenes IRT. Este proceso permite extraer la distribución de frecuencias de las temperaturas superficiales para cualquier geometría. El histograma de frecuencias resultante se integra para calcular la pérdida total de calor, modelando la contribución combinada de cada píxel como un foco de

transferencia de calor, cuya escala se ajusta a las dimensiones reales de la superficie. Los resultados demuestran la eficacia del procesamiento digital de imágenes IRT 2D para este fin. La comparación con métodos de cálculo convencionales mostró una diferencia de aproximadamente el 14% en el valor de las pérdidas, lo que valida el potencial del nuevo método para lograr una mayor exactitud en la determinación de pérdidas térmicas. En conclusión, la sinergia entre el procesamiento de imágenes termográficas y las ecuaciones de transferencia de calor constituye una herramienta robusta y precisa con amplias perspectivas para la evaluación de fenómenos de transporte de calor en entornos industriales.

**Palabras clave:** rendimiento térmico; termografía infrarroja; transferencia de calor; procesamiento de imágenes.

## **ABSTRACT**

Assessing thermal performance is crucial for energy management and diagnostics in industry. This paper introduces an innovative method to quantify heat losses from free convection and radiation in industrial systems using infrared thermography (IRT), applied to the top section of a distillation column in a rum distillery. The main contribution is an approach that calculates energy losses based on an optimized frequency analysis of two-dimensional (2D) thermographic images. The method employs the advanced Otsu multi-threshold algorithm for digital processing of IRT images. This process extracts the frequency distribution of surface temperatures for any geometry. The resulting frequency histogram is integrated to calculate the total heat loss, modeling the combined contribution of each pixel as a heat transfer element, scaled according to the real dimensions of the surface under study. The results demonstrate the effectiveness of 2D IRT digital image processing for this purpose. A comparison with conventional calculation methods revealed a difference of approximately 14% in the heat loss value, validating the potential of this new approach for achieving greater accuracy in determining thermal losses. In conclusion, the synergy between thermographic image processing and heat transfer equations constitutes a robust and precise tool with broad potential for evaluating heat transport phenomena in industrial settings.

**Keywords:** thermal performance; infrared thermography; heat transfer; Image processing.

Recibido: 05/01/2026

Aceptado: 11/03/2026

## Introducción

La gestión sostenible de la energía en el sector industrial requiere minimizar las pérdidas de calor. Evaluar el rendimiento térmico de las operaciones unitarias resulta crucial para lograr una gestión eficiente de la energía en los procesos. Las pérdidas de calor impactan directamente en la economía y en la gestión de las tecnologías químicas, constituyendo un indicador clave no solo para el desarrollo sostenible y la protección del medio ambiente, sino también para incrementar la competitividad empresarial y reducir los costos de producción.<sup>(1)</sup>

La pérdida de calor en operaciones industriales se determina convencionalmente mediante un balance energético basado en el cambio de entalpía del fluido intercambiado y considerando los mecanismos de transporte de calor involucrados, los cuales se expresan mediante modelos matemáticos. Este procedimiento puede resolverse aplicando métodos iterativos computacionales para lograr la convergencia de los mecanismos de transferencia en función de la temperatura de la pared. No obstante, el método convencional presenta una limitación significativa: los resultados se obtienen en unidades promediadas, lo que imposibilita considerar la contribución individual de las distintas secciones superficiales y componentes del equipo evaluado. La estimación precisa de pérdidas de calor en regiones geoméricamente complejas, donde el área de transferencia de calor adopta formas irregulares, constituye el aspecto que genera mayores errores en los cálculos.<sup>(2)</sup>

La termografía es un método ampliamente utilizado para la medición de temperaturas superficiales.<sup>(3, 4)</sup> Los enfoques basados en termografía infrarroja (IR), como técnica no invasiva para analizar fenómenos de transporte de calor, se han consolidado gracias a su facilidad de uso, menor costo, reducción del tiempo requerido, alta precisión y simplicidad en las mediciones.<sup>(5)</sup>

Las cámaras termográficas detectan radiación emitida en el rango infrarrojo de onda larga<sup>(5)</sup>. La radiación infrarroja es emitida por todos los objetos cuya temperatura se encuentra por encima del cero absoluto, de acuerdo con la ley de

radiación del cuerpo negro. Los termogramas representan visualizaciones de la cantidad de energía infrarroja emitida, transmitida y reflejada por un objeto. <sup>(6)</sup>

Con la tecnología IR es posible obtener informes termográficos rápidos y confiables en forma de imágenes térmicas identificadas en colores o escala de grises <sup>(7, 8, 9, 10, 11)</sup>. Sin embargo, para calcular la energía emitida por un objeto como disipación/pérdida de calor, se requiere conocer la forma específica y orientación espacial de su superficie. En la termografía bidimensional (2D) clásica, esto solo es posible si el objeto es plano y se conoce la distancia entre la cámara y el objeto y su tamaño. <sup>(3)</sup>

Con el avance de algoritmos computacionales para procesamiento y reconstrucción digital de imágenes, basados en redes neuronales convolucionales e inteligencia artificial (aprendizaje profundo y aprendizaje automático), la termografía por infrarrojos (IRT) se ha consolidado como un método altamente preciso y sensible para el análisis de gestión energética <sup>(3, 12)</sup>. Recientemente, se han desarrollado métodos más precisos diseñados para mejorar las aplicaciones de IRT en la medición de pérdidas de calor, destacando la termografía 3D como resultado de la fusión de datos provenientes de sensores térmicos y geométricos, combinada con modelado por elementos finitos de superficies en arreglos triangulares. <sup>(3, 13, 14)</sup>

Este enfoque consiste en la reconstrucción de un modelo geométrico complejo del objeto medido, sobre el cual se superpone la superficie de datos de temperatura. Los termogramas 3D permiten analizar y visualizar objetos complejos dentro de un único modelo integrado, a diferencia de múltiples termogramas 2D individuales que suelen presentarse en informes de medición convencionales. Esta integración proporciona una visión global especialmente valiosa para objetos de medición grandes o de geometría compleja, como instalaciones eléctricas o portadoras de calor. <sup>(3)</sup>

Sin embargo, aunque la termografía 3D permite análisis automatizado, la complejidad de las disposiciones de sensores necesarias y los algoritmos de reconstrucción de formas en 3D representan inconvenientes significativos para aplicaciones prácticas en entornos industriales no controlados o escenarios operativos reales muy cambiantes, además de ser significativamente más costoso de implementar, por los requerimientos de mayor cantidad de sensores y costos computacionales asociados.

A pesar de sus ventajas, los métodos IRT son susceptibles a la influencia de diferentes variables y errores de medición debido a factores como: propiedades superficiales del material (emisividad, reflexividad, manchas y colores); factores ambientales (irradiancia solar incidente, humedad y temperatura del aire, velocidad del viento); y factores de localización (distancia, campo de visión y presencia de objetos no deseados).<sup>(15,16)</sup> No obstante, estos errores pueden minimizarse adoptando normas de medición IRT como la Directiva ISO 2012/27/UE, CEN [E-1213] y ASTM (E-1543).<sup>(17)</sup> Además, el desarrollo de nuevos sensores IR junto con sistemas de control de alto rendimiento y algoritmos mejorados de procesamiento computacional de imágenes han creado un escenario tecnológico adecuado para la disponibilidad de cámaras IR y software de análisis de imágenes muy precisos y asequibles <sup>(11,18)</sup>, mejorando radicalmente el proceso de evaluación térmica en diferentes campos de investigación e ingeniería. <sup>(2,18)</sup>

El objetivo de este estudio es proporcionar un método computacional lo suficientemente práctico y de mayor exactitud para el análisis de imágenes IRT con el objetivo de realizar cálculos de pérdidas de calor en ambientes industriales. Aunque no logra los extremos niveles de precisión reportados para la termografía 3D, el enfoque presentado permite una evaluación mucho más optimizada, practica y suficientemente precisa para el cálculo de pérdidas de calor con significativas ventajas comparado con los métodos convencionales usualmente aplicados en la industria donde se realizan simplificaciones que inevitablemente conducen a errores de cálculos tanto por sobre como subestimación. El método propuesto es una herramienta de cálculo que puede ser adaptable a diferentes escenarios industriales, enfocado en aplicaciones prácticas. Los algoritmos propuestos para procesar imágenes IRT de temperatura superficial ofrecen resultados rápidos, económicos y complementarios a los métodos convencionales de cálculo de balance energético.

## **Métodos utilizados y condiciones experimentales**

### **Superficie objeto de estudio**

Se seleccionó como superficie objetivo (caso estudio) una sección circular de la pared exterior (radio = 0,63 m) de la tapa de cobre (no pulido) de una columna de destilación de alcohol en una destilería del mayor productor de ron en Cuba.

El objetivo de este estudio es proporcionar un método computacional lo suficientemente práctico y de mayor exactitud para el análisis de imágenes IRT con el objetivo de realizar cálculos de pérdidas de calor en ambientes industriales. Aunque no logra los extremos niveles de precisión reportados para la termografía 3D, el enfoque presentado permite una evaluación mucho más optimizada, practica y suficientemente precisa para el cálculo de pérdidas de calor con significativas ventajas comparado con los métodos convencionales usualmente aplicados en la industria donde se realizan simplificaciones que inevitablemente conducen a errores de cálculos tanto por sobre como subestimación. El método propuesto es una herramienta de cálculo que puede ser adaptable a diferentes escenarios industriales, enfocado en aplicaciones prácticas. Los algoritmos propuestos para procesar imágenes IRT de temperatura superficial ofrecen resultados rápidos, económicos y complementarios a los métodos convencionales de cálculo de balance energético.

## Métodos utilizados y condiciones experimentales

### Superficie objeto de estudio

Se seleccionó como superficie objetivo (caso estudio) una sección circular de la pared exterior (radio = 0,63 m) de la tapa de cobre (no pulido) de una columna de destilación de alcohol en una destilería del mayor productor de ron en Cuba.

La figura 1 presenta la sección del tope de la columna objeto de estudio. Las mediciones se realizaron durante la operación de refinación del alcohol superfino "A" (95,5 % v/v).

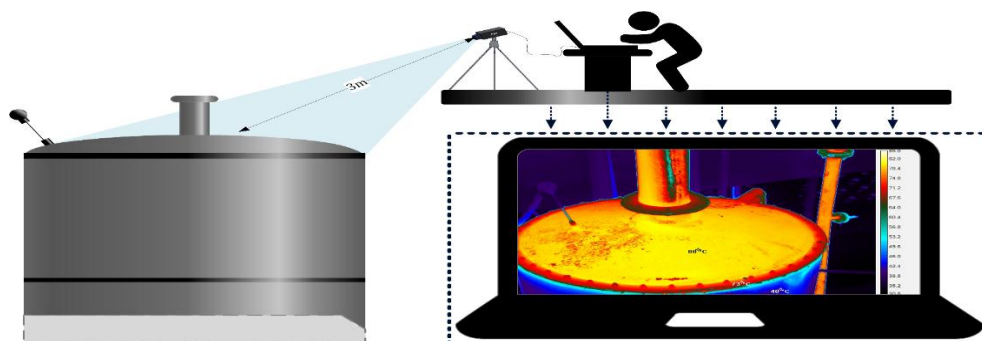


**Fig. 1-** Imagen de la tapa de la columna de destilación objeto de estudio. Radio: 0.63 m, material: cobre (no pulido)

## Adquisición de las imágenes IRT

Las imágenes térmicas se obtuvieron utilizando una cámara termográfica FLIR® modelo A655sc con las siguientes características técnicas principales: resolución infrarroja de 640 × 480 píxeles (16 bits por píxel), sensibilidad térmica < 0,05 °C, distancia focal mínima de 0,5 m, frecuencia de captura de 50 Hz, rango espectral de 7,5 a 14  $\mu\text{m}$ , rango de emisividad ajustable de 0,01 a 1, y error de medición de  $\pm 2\%$ .<sup>(19)</sup>

Las imágenes termográficas fueron adquiridas digitalmente mediante el software ResearchIR® asociado a la cámara, que permite visualizar y registrar la temperatura de las muestras al ajustar previamente parámetros como emisividad, temperatura reflejada y distancia focal. Además, el software incorpora corrección automática considerando condiciones ambientales como temperatura y humedad del aire.<sup>(20)</sup> Para la obtención de la imagen, la cámara se posicionó sobre un trípode, orientado frontalmente a la superficie analizada. La figura 2 presenta un esquema simplificado del proceso de adquisición de la imagen térmica infrarroja (IR) de la tapa de la columna de destilación. Dado que la tapa se encuentra en un plano horizontal, siempre se sugiere realizar una toma aérea que permita capturar completamente toda la región circular. Sin embargo, como generalmente ocurre en instalaciones industriales donde el espacio de diseño es compacto, no fue posible efectuar dicha captura debido a las características particulares del entorno de instalación. Sin embargo, y como alternativa geométrica, la adquisición se realizó desde una plataforma cercana a la columna, utilizando un ángulo frontal a una de las secciones circulares de la columna a una distancia focal de aproximadamente 3 m que permitió obtener una captura casi total de la superficie.



**Fig. 2** - Esquema simplificado de las condiciones de adquisición de la imagen IR

La emisividad de la superficie se estableció en el software ResearchIR<sup>®</sup> tras realizar una calibración cruzada con un sensor de temperatura de contacto tipo PT100, modelo B01BLCD41M/EP, con rango de medición de 40 a 400 °C, coeficiente de temperatura de  $3,851 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  y precisión clase B según norma IEC 60751 ( $\pm 0,3 \text{ °C} + 0,5\%$ ).<sup>(20)</sup> El sensor se fijó directamente sobre la superficie objetivo. Las mediciones IR y la calibración correspondiente se realizaron manteniendo una distancia constante de 3 m entre la cámara y la superficie analizada, obteniéndose una emisividad superficial de  $\varepsilon_s=0,78$  valor que se encuentra en el rango de emisividad del cobre no pulido (0,6-0,9).<sup>(8)</sup>

Adicionalmente, se midieron la humedad relativa del aire (62%) y la temperatura ambiente (29,6 °C) en las proximidades de la superficie y la cámara, utilizando un medidor de humedad portátil multifunción PCE-MMK®,<sup>(21)</sup> con rango de medición de temperatura de -40 a 70 °C ( $\pm 1 \text{ °C}$ ) y rango de humedad relativa de 0 a 100% ( $\pm 3,5\%$ ).

La velocidad del aire se verificó con un anemómetro-termómetro IR PCE-VA 11-ICA, con rango de velocidad de 0,4 a 30 m/s ( $\pm 3\%$  o  $\pm 0,2 \text{ m/s}$ ) y rango de temperatura del aire de -10 a 60 °C ( $\pm 2\%$  o  $\pm 0,1 \text{ °C}$ ). Este instrumento también incluye función de termómetro IR puntual para confirmación cruzada de mediciones térmicas. El anemómetro no registró corrientes de aire significativas en las proximidades de las superficies medidas, confirmando que los mecanismos dominantes de pérdida de calor son la convección libre y la radiación térmica.

### **Algoritmo matemático del procesamiento de las imágenes IRT**

Se empleó el método avanzado multiumbral de Otsu (*Multi-Threshold Otsu*, MTO) para la segmentación y umbralización de imágenes IR de tipo RGB en diferentes intensidades de escala de grises.<sup>(22, 23)</sup> El MTO es una versión avanzada del método clásico de Otsu, diseñado inicialmente para segmentación binaria de imágenes. En su variante multiumbral, divide las imágenes en varias regiones según la intensidad de los píxeles, resultando especialmente útil para imágenes térmicas donde los valores de píxeles corresponden a diferentes niveles de temperatura.<sup>(22)</sup>

Este enfoque utiliza el histograma de frecuencia en píxeles de la imagen para identificar umbrales óptimos que maximicen la varianza entre clases, logrando una segmentación más precisa de áreas con características distintas.<sup>(24)</sup>

Para imágenes térmicas, esta técnica permite separar zonas con diferentes temperaturas para análisis específicos, como detección de anomalías térmicas o monitoreo de equipos.

Primeramente, se transformó la imagen termográfica RGB en escala de grises, que se reconstruyó utilizando MTO y se separó en diferentes intensidades mediante las transformaciones  $\omega_0$  y  $\mu_0$ , que representan la relación del número de píxeles y el nivel medio de escala de grises, respectivamente. El fondo de la imagen también se separa en dos parámetros:  $\omega_1$  y  $\mu_1$ . Así, según el MTO, la media total del nivel de gris de la imagen se define matemáticamente como:

$$\mu = \omega_0(t)\mu_0(t) + \omega_1(t)\mu_1(t) \quad (1)$$

donde

$t$  denota un nivel de gris específico de la imagen.

A continuación, la imagen se segmenta de forma óptima maximizando la función  $f_s(t)$  por la expresión:

$$f_s(t) = \omega_0(t)(\mu_0(t) - \mu)^2 + \omega_1(t)(\mu_1(t) - \mu)^2 \quad (2)$$

El valor del nivel de gris  $t_{op} = \arg_{t \in \{0,1,\dots,(L-1)\}} \max f_s(t)$  correspondiente al valor máximo de  $f_s(t)$  se selecciona como valor umbral para la segmentación de la imagen en diferentes intensidades de gris. Los histogramas de la imagen IR ( $N \times M$  /2D) se obtuvieron considerando  $I(x,y)$  como el valor de gris en el punto  $(x,y)$ , siendo entonces el nivel de gris ( $L$ ) definido como  $I(x,y) \in [0,1,\dots,(L-1)]$ . Teniendo  $H(i)$  como la frecuencia "i" en las imágenes en escala de grises  $I(x,y)$ , el histograma de distribución de frecuencias en escala de grises puede expresarse como:

$$h(i) = \frac{H(i)}{N \times M} \quad (3)$$

Con  $\{I(x,y) \leq t\}$  y  $\{t \leq I(x,y) \leq (L-1)\}$ .

## Modelos para el cálculo de las pérdidas de calor

El coeficiente de transferencia de calor por convección ( $h_k$ ) se determinó según:

$$h_k = \frac{\overline{Nu_k} \cdot k}{L} \quad (4)$$

Con las correlaciones empíricas del número promedio de Nusselt ( $\overline{Nu_k}$ ) para convección natural sobre superficies horizontales (superficie superior caliente) <sup>(25)</sup>:

$$\text{Para } 10^4 < Ra_L \leq 10^7 \quad \overline{Nu_k} = 0.54 \cdot Ra_L^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

$$\text{Para } 10^7 < Ra_L \leq 10^{11} \quad \overline{Nu_k} = 0.15 \cdot Ra_L^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

donde:

$$Ra_L = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot L^3}{\vartheta \cdot \alpha} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{1}{T_f} \quad (8)$$

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (9)$$

Las propiedades termo-físicas del aire ( $k, \vartheta, \alpha$ ) se determinan en función de  $T_f$  donde:

$\Delta T$ : Gradiente de temperatura (K o °C)

$H_k$ : coeficiente de transferencia de calor por convección (en  $W/m^2 \cdot K^{-1}$ )

$T_s$ : Temperatura de la superficie (K o °C)

$T_\infty$ : Temperatura del aire (K o °C)

$L$ : Longitud característica de la geometría (m)

$k$ : Conductividad térmica ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )

$g$ : Constante de aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )

$\vartheta$ : Viscosidad cinemática del aire ( $m^2/s$ )

$\alpha$ : Difusividad térmica ( $m^2/s$ )

$Ra_L$ : Número de Rayleigh (adimensional)

$\overline{Nu_k}$ : Número de Nusselt (adimensional)

$\beta$ : Coeficiente de dilatación térmica volumétrica del aire ( $K^{-1}$ )

$T_f$ : Temperatura media del fluido (K o °C)

La pérdida de calor específica por convección ( $q_k$ ) se calcula según:

$$q_k = h_k \cdot \Delta T \quad (10)$$

Con:

$$\Delta T = (T_s - T_\infty)$$

La pérdida de calor por radiación se calculó según la ley de Stefan-Boltzmann <sup>(26)</sup>:

$$q_{ir} = \sigma \cdot \varepsilon_s \cdot (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (11)$$

donde

$\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ) y  $\varepsilon_s$  es la emisividad del cuerpo gris (adimensional).

La pérdida total de calor ( $Q_T$ ) debida a convección libre y radiación se calculó como:

$$Q_k = S \cdot q_k \quad (12)$$

$$Q_{ir} = S \cdot q_{ir} \quad (13)$$

$$Q_T = (Q_k + Q_{ir}) = S \cdot (q_k + q_{ir}) \quad (14)$$

donde:

$q_k$ : Pérdida de calor convectiva específica ( $\text{W/m}^2$ )

$q_{ir}$ : Intensidad de radiación ( $\text{W/m}^2$ )

$S$ : Superficie ( $\text{m}^2$ )

$Q_k, Q_{ir}$ : Pérdida de calor por convección y radiación respectivamente (en W)

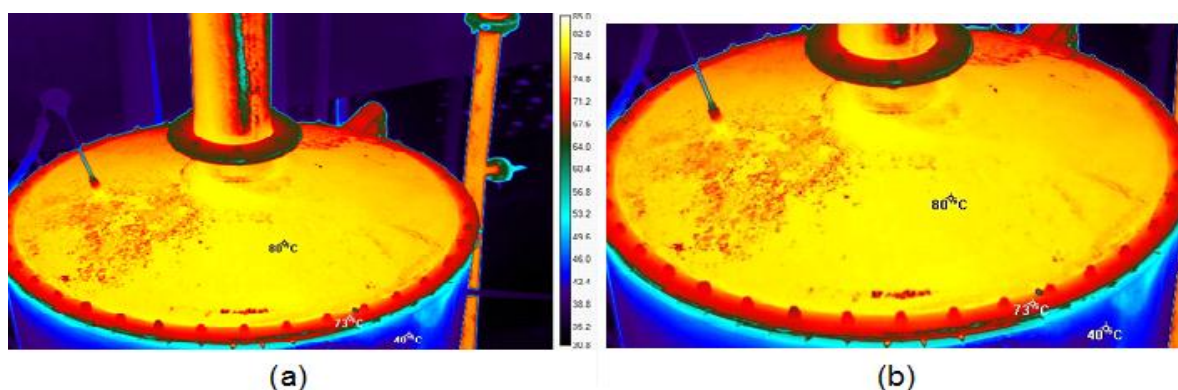
Se implementó el software *ImageJ*<sup>®</sup> para recorte, ajuste y medición de imágenes.

El procesamiento de imágenes IR y el ajuste matemático se realizaron mediante MATLAB<sup>®</sup>, y se utilizaron Microsoft Visio Drawing<sup>®</sup> y EdrawMax<sup>®</sup> para la creación de gráficas, esquemas y dibujos.

## Resultados y discusión

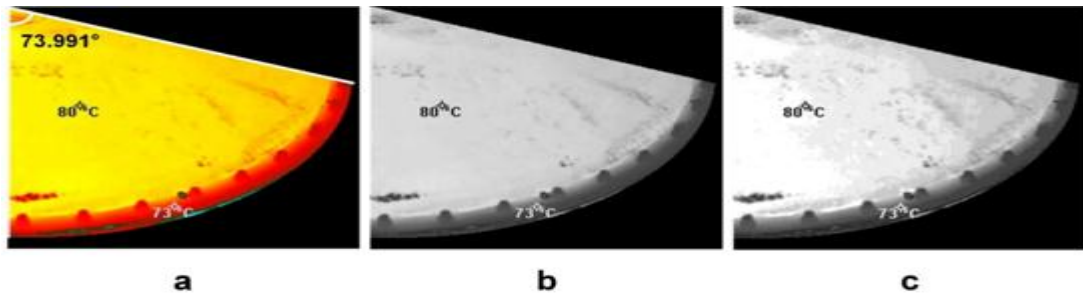
La figura 3 (a) muestra la imagen térmica IR de la tapa de la columna de destilación. A diferencia de la imagen convencional presentada en la figura 1, en la imagen IR se pueden observar diferentes regiones a diferentes niveles de temperatura, donde las pérdidas de calor a calcular estarán en función de los valores de temperatura y el área superficial de cada región.

La figura 3 (b) presenta la imagen IR ya recortada digitalmente para eliminar el procesamiento de las regiones circundantes y solo enfocar el procesamiento digital en la región de interés (tapa de la columna). La imagen IR es presentada inicialmente en su paleta de color original RGB (Rojo + Verde + Azul) por sus siglas en inglés, con el propósito de analizar exclusivamente la región de interés y minimizar interferencias externas del entorno.



**Fig. 3** - Imagen térmica IR en RGB de la tapa y su entorno (a) y recortada (b) para analizar exclusivamente la región de interés y minimizar interferencias externas del entorno

Debido a la imposibilidad de realizar una toma aérea completa, se realizó un recorte de la imagen RGB correspondiente a una sección angular de la tapa de la columna. Por medio de las herramientas de medición digital incorporadas en el software *ImageJ*<sup>®</sup>, se determinó que el ángulo de dicho sector circular es aproximadamente  $73,991^\circ$ , como se muestra en la figura 4(a). Posteriormente, la imagen del ángulo de recorte en RGB, se convirtió a escala de grises (figura 4(b)). No se separaron los tres canales de color (R, G, B), ya que cada uno contiene información relevante sobre los perfiles de temperatura. A continuación, la imagen en escala de grises se segmentó mediante el método multiumbral de Otsu (MTO), aplicando un umbral  $MTO_T = 15$  (figura 4(c)). Esta elección se justifica porque, para lograr una precisión satisfactoria en el cálculo de pérdidas de calor termográficas en este caso específico, es necesario aplicar al menos 15 umbrales MTO, según lo reportado en el estudio publicado en.<sup>(26)</sup>

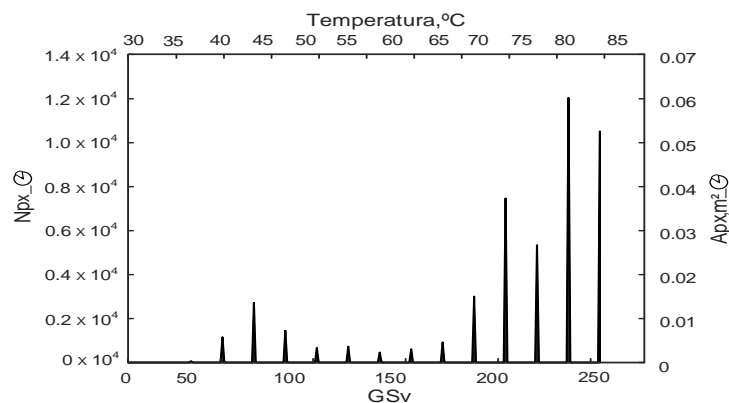


**Fig. 4** - Fases de ajuste y procesamiento. (a) Imagen RGB recortada del sector circular, (b) Imagen recortada convertida en escala de grises. (c) Resultado de la segmentación aplicando el  $MTO_T=15$ . Superficie del sector circular  $0.255 \text{ m}^2$  aplicando software *ImageJ*<sup>®</sup>

La figura 5 presenta el histograma de frecuencias de la distribución del número de píxeles ( $N_{px}$ ) en función del valor de escala de grises (GSv) para la imagen IR recortada convertida a escala de grises aplicando  $MTO_T=15$ . Se incluyeron ejes complementarios de temperatura superficial equivalente ( $T_s$ ) y área correspondiente ( $A_{px}$ , en  $\text{m}^2$ ). Para determinar la superficie en escala de píxeles, se calcula el factor de escala a partir de la aplicación del software *ImageJ*<sup>®</sup> para contar el número de píxeles lineales en la imagen respecto a la dimensión física real de la tapa de la columna de destilación (radio = 0,63 m), lo que corresponde a 430,15 px/m. Así, el factor de escala de superficie es  $S_f = (430,15 \text{ px})^2 = 185\,036,5 \text{ px/m}^2$ .

Luego, la superficie se calcula como:

$$A_{px} = \frac{N_{px}}{S_f} \quad (15)$$



**Fig. 5** - Histograma de frecuencias de la distribución de píxeles en función del GSv y de la temperatura superficial ( $T_s$ ) para la imagen IR en escala de grises del sector circular aplicando  $MTO_T=15$

A partir de histograma de distribución de frecuencias (figura 5), se observa que los píxeles se concentran principalmente en cuatro picos destacados en escala de grises GSv: 204; 221; 238 y 255. Estos valores corresponden a temperaturas de 74 °C, 77,67 °C, 81,33 °C y 85,0 °C, respectivamente. El pico de mayor amplitud se encontró a los 81,33 °C ~ 0,065 m<sup>2</sup> (25,55 % de superficie del sector circular analizada = 0,255 m<sup>2</sup>). Después se visualizan en orden decreciente, los picos a 85 °C ~ 0,056 m<sup>2</sup> (22,32 %), 74 °C ~ 0,04 m<sup>2</sup> (15,84 %), 77,67 °C ~ 0,028 m<sup>2</sup> (11,32 %). Adicionalmente, se identificaron otros nueve picos de menor amplitud, ubicados entre 41 °C y 70,33 °C. Entre ellos destacan correspondientes a 44,67 °C ~ 0,0146 m<sup>2</sup> y 70,33 °C ~ 0,016 m<sup>2</sup>, sumando conjuntamente alrededor de 12,13 % la de superficie. Siete picos restantes presentan amplitudes similares, cercanas a 0,005 m<sup>2</sup> cada uno, contribuyendo en total con aproximadamente 12,50 % de superficie analizada.

El cálculo de pérdidas de calor total del sector circular de la tapa del destilador se desarrolla según lo reportado en el estudio publicado en <sup>(26)</sup> donde, mediante análisis y procesamiento de imágenes térmicas por infrarrojos puede realizarse de acuerdo con el modelo de transferencia de calor adaptado matemáticamente para el histograma de distribución de frecuencias de píxeles de la siguiente manera <sup>(26)</sup>:

$$Q_T = (Q_k + Q_{ir}) = \sum_{i=1}^{Npx} Apx_i \cdot (h_k \cdot \Delta T + q_{ir})_i \quad (16)$$

donde:

$Apx_i$ : Amplitud de superficie para cada pico de histograma de frecuencias "i" (m<sup>2</sup>)

$(h_k \cdot \Delta T + q_{ir})_i$ : Pérdida de calor específica combinada por radiación y convección para cada pico "i" de histograma de frecuencias (W/m<sup>2</sup>)

La longitud característica equivalente de cada pico ( $L_i$ ) puede definirse como <sup>(26)</sup>:

$$L_i = \sqrt{Apx_i} \quad (17)$$

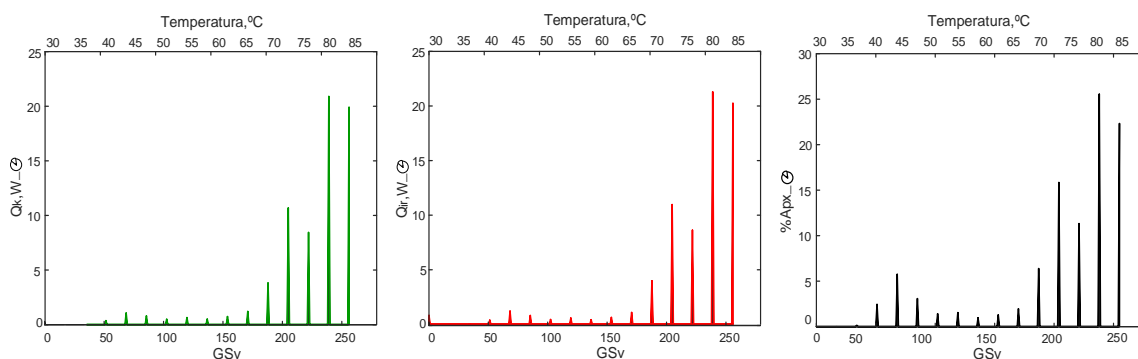
Como se analiza el sector circular en la tapa de la columna, Las pérdidas de calor total de toda región de tapa de columna de destilación se pueden determinar como:

$$Q_T = (Q_k + Q_{ir}) \cdot (360/\theta) \quad (18)$$

donde:

$\theta$ : Ángulo del sector circular (figura 4).

En la figura 6 se representan los histogramas de distribución de frecuencias correspondientes a las pérdidas de calor del sector circular de la superficie exterior de la tapa del destilador, considerando tanto convección libre como radiación. De manera similar a lo observado en la figura 5, los histogramas mostrados en la figura 6 exhiben cuatros picos dominantes de pérdidas de calor en el rango de temperaturas comprendido entre 74 °C y 85 °C. Estos picos son evidentes tanto para mecanismo de convección libre como para radiación. Se identifica que el 75,03 % de superficie asociada a este rango de temperaturas contribuye aproximadamente a 85,79 % de pérdidas de calor por convección libre y 85,41 % de pérdidas de calor por radiación.



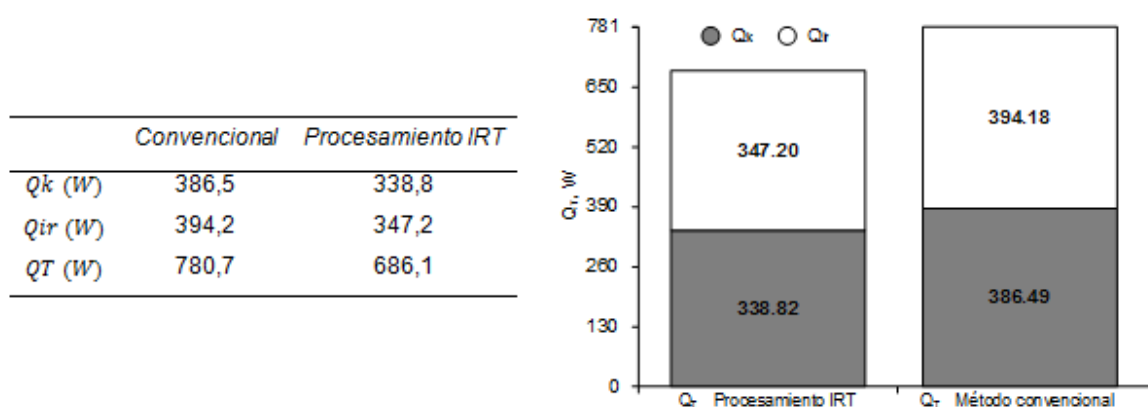
**Fig. 6** - Histogramas de frecuencia de distribución de pérdidas de calor del sector circular de superficie exterior de la tapa del destilador debidas a la convección libre y radiación en el sector circular

Con vistas a comparar los resultados del método propuesto por procesamiento digital de imágenes IR, se calcularon también las pérdidas de calor totales en la tapa de la columna de destilación aplicando el método tradicional, asumiendo una temperatura  $T_s$  predominante de 80 °C según la medición puntual de la temperatura con cámara termográfica (figura 3). Este cálculo comparativo se hace con el propósito de comparar los resultados con aquellos obtenidos a través del procesamiento de imágenes termográficas.

Según el método convencional, la longitud característica equivalente para una superficie circular horizontal de diámetro  $D^{(25)}$  puede definirse geoméricamente como:

$$L = \frac{D}{4} \quad (19)$$

La figura 7 presenta el gráfico comparativo de barras apiladas y su tabla de resultados correspondientes para el cálculo de pérdidas de calor para la totalidad de la región analizada aplicando procesamiento de imágenes a  $MTO_T = 15$ , y el método convencional de cálculo, considerando mecanismos de convección libre y radiación. Se observa que las pérdidas de calor por radiación superan ligeramente a las producidas por convección libre, representando 50,60% aplicando procesamiento de imágenes y un 50,49 % aplicando el método convencional de las pérdidas totales. Esto demuestra la consistencia relativa entre ambos métodos de cálculo.



**Fig. 7** - Resultados y gráfico de barras apiladas de las pérdidas de calor de la tapa de la columna de destilación por convección libre y radiación

Al comparar numéricamente los resultados aplicando ambos métodos, se encontró una diferencia de alrededor de un 14%. Esto se debe principalmente a que el método convencional al asumir una temperatura promedio de valor puntual, desestima las otras regiones de la superficie que se encuentran a menor (y mayor) temperaturas, las cuales pierden calor por convección y radiación a otras intensidades diferentes. Esto demuestra, que el método propuesto resulta mucho más sensible, eficiente y exacto que la apreciación puntual comúnmente aplicada en los cálculos de pérdidas de calor en entornos industriales. Estas diferencias entre resultados serán mucho más marcadas, cuanto más diversa y compleja sea la superficie en térmicos geométricos y sus correspondientes gradientes térmicos. Tanto la sobre, como la subestimación de las pérdidas de calor en ambientes industriales, puede traer como consecuencia problemas en la planificación de recursos, toma de decisiones logísticas en las operaciones, así como ineficiencia

en los planes de acción para el mantenimiento preventivo. Esto último, hace que el método de procesamiento de imágenes IR propuesto sea una valiosa herramienta de cálculo en manos de especialistas de los procesos químicos industriales.

## Conclusiones

1. El procesamiento digital de imágenes termográficas IR (2D) demostró ser una herramienta de cálculo eficiente, sensible y muy confiable para determinar las pérdidas de calor por convección libre y radiación en ambientes industriales. Además de ser un método rápido y confiable, su valor radica en la forma matemática-computacional para resolver cálculos complejos en términos geométricos y de gradientes térmicos donde los métodos convencionales aumentan el error.
2. Al tomar como caso estudio el cálculo de las pérdidas de calor en la tapa de la columna de destilación aplicando el nuevo método, se observa una diferencia del 14 % en las pérdidas de calor totales calculadas por el método convencional, asumiendo una temperatura puntual excluyente de los valores de temperatura tanto inferiores como superiores presentes en la distribución superficial de la tapa de la columna, lo que genera una sobreestimación de la contribución térmica en las zonas no representadas por dicho valor.
3. El enfoque propuesto ofrece una contribución significativa al proporcionar una medición rápida, directa y de mayor exactitud de disipación de calor superficial por radiación térmica y convección natural, lo que permite optimizar la eficiencia energética térmica de los sistemas industriales.

## Referencias bibliográficas

1. KOSTOV, Konstantin, *et al.* Experimental determination of the heat exchange coefficient of industrial steam pipelines. *EUREKA: Physics and Engineering*, 2022, p. 55-66. [Consultado 13 diciembre 2025] <http://journal.eu-jr.eu/engineering/article/view/2473>
2. GUAN, Hang, *et al.* Automatic fault diagnosis algorithm for hot water pipes based on infrared thermal images. *Building and environment*, 2022, **218**, p. 109111. [Consultado 15 enero 2026]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132322003481>
3. SCHMOLL, Robert, *et al.* Method and experimental investigation of surface heat dissipation measurement using 3D thermography. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 2022, **11**(1), p. 41-49. [Consultado 3 febrero 2026]. <https://jsss.copernicus.org/articles/11/41/2022/>
4. SCHRAMM, Sebastian, *et al.* Target analysis for the multispectral geometric calibration of cameras in visual and infrared spectral range. *IEEE Sensors Journal*, 2020, **21**(2), p. 2159-2168. [Consultado 5 enero 2026]. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9178752/>
5. SPEECKAERT, Reinhart, *et al.* Beyond visual inspection: The value of infrared thermography in skin diseases, a scoping review. *Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology*, 2024, **38**(9), p. 1723-1737. [Consultado 3 febrero 2026].<sup>^</sup> <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jdv.19796>
6. NETO, Gerardo Aurélio Cruz, *et al.* Infrared thermography as a non-invasive method to quantify the heat stress response in weaned piglets after road transport in a semi-arid region. *International Journal of Biometeorology*, 2025, **69**(3), p. 633-642. [Consultado 21 diciembre 2025]. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00484-024-02844-w>
7. LIANG, Xiaolong, *et al.* Advancing railway infrastructure maintenance: Thermodynamic parameter inversion of ballast bed and feasibility assessment of

fouling detection via infrared thermography (IRT). *Infrared Physics & Technology*, 2024, **141**, p. 105398. [Consultado 11 enero 2026].  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350449524002822>

8. ZHANG, Dongjie, et al. An in-situ detection method for assessing the thermal transmittance of building exterior walls using unmanned aerial vehicle–infrared thermography (UAV-IRT). *Journal of Building Engineering*, 2024, **91**, p. 109724. [Consultado 3 febrero 2026].  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710224012920>

9. PEACOK, Thayset Marino, et al. Infrared thermography: A new approach for the characterization and management of activated carbons applied in water treatment. *Chemical Engineering Science*, 2021, **246**, p. 116881. [Consultado 3 enero 2026].  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250921004462>

10. RAZMARA, Parsa; KHEZRESMAEILZADEH, Tina; JENKINS, B. Keith. Fever detection with infrared thermography: Enhancing accuracy through machine learning techniques. En 2024 IEEE EMBS International Conference on Biomedical and Health Informatics (BHI). IEEE, 2024. p. 1-8. [Consultado 23 febrero 2026].  
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10913591/>

11. PARENTE, Claudio; PEPE, Massimiliano. Benefit of the integration of visible and thermal infrared images for the survey and energy efficiency analysis in the construction field. *Journal of Applied Engineering Science*, 2019, **17**( 4) [Consultado 13 enero 2026].  
<https://aseestant.ceon.rs/index.php/jaes/article/view/22080>

12. YOUSUF, Adeel; KHAWAJA, Hassan; VIRK, Muhammad S. A review of infrared thermography applications for ice detection and mitigation. *Cold Regions Science and Technology*, 2024, **218**, p. 104058. [Consultado 11 enero 2026].  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165232X23002896>

13. SADHUKHAN, Debanjan, et al. Estimating surface temperature from thermal imagery of buildings for accurate thermal transmittance (U-value): A machine

learning perspective. *Journal of Building Engineering*, 2020, **32**, p. 101637. [Consultado 23 diciembre 2025].

14. TANDA, Giovanni; MIGLIAZZI, Mauro. Infrared thermography monitoring of solar photovoltaic systems: A comparison between UAV and aircraft remote sensing platforms. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2024, **48**, p. 102379. [Consultado 18 enero 2026]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2451904923007321>

15. POZZER, Sandra, et al. Passive infrared thermography for subsurface delamination detection in concrete infrastructure: Inference on minimum requirements. *Computers & Structures*, 2024, **305**, p. 107529. [Consultado 5 diciembre 2025]. 16. PATHAK, P., et al. Examining infrared thermography based approaches to rapid fatigue characterization of additively manufactured compression molded short fiber thermoplastic composites. *Composite Structures*, 2025, **351**, p. 118610. [Consultado 8 enero 2026]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822324007384>.

17. KAPLAN, Herbert. *Practical applications of infrared thermal sensing and imaging equipment*. SPIE press, 2007. [Consultado 3 febrero 2026]. <https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=vuJ8dalst-kC&oi=fnd&pg=PR13&dq=KAPLAN,+Herbert.+Practical+applications+of+infrared+thermal+sensing+and+imaging+equipment.+SPIE+press,+2007.+&ots=A6LCAJwDSz&sig=ld7CbOiLPdZTM6oMtqzk6zkRZAs>

18. UKIWE, Ezechukwu Kalu, et al. Deep learning model for detection of hotspots using infrared thermographic images of electrical installations. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 2024, **11**(1), p. 24. [Consultado 9 diciembre 2025]. <https://link.springer.com/article/10.1186/s43067-024-00148-y>

19. FLIR Camera [Internet]. [Consultado 12 junio 2024]. <https://www.manualslib.com/manual/2798538/Flir-A6-Series.html>

20. FLIR T. Try out ResearchIR Software [Internet]. [Consultado 3 junio 2025]. <https://www.flir.com/support-center/instruments2/try-out-researchir-software/>

21. Portable multifunction PCE-MMK [Internet]. [Consultado 15 junio 2024]. [https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/medidor-de-humedad-de-papel-pce-instruments-medidor-de-humedad-de-papel-pce-mmk-1-det\\_4066075.htm](https://www.pce-instruments.com/espanol/instrumento-medida/medidor/medidor-de-humedad-de-papel-pce-instruments-medidor-de-humedad-de-papel-pce-mmk-1-det_4066075.htm)
22. ZHENG, Jianfeng, et al. OTSU multi-threshold image segmentation based on improved particle swarm algorithm. *Applied sciences*, 2022, **12**(22), p. 11514. [Consultado 20 noviembre 2025]. <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/22/11514>
23. GUO, Yanmin, et al. Otsu multi-threshold image segmentation based on adaptive double-mutation differential evolution. *Biomimetics*, 2023, **8**(5), p. 418. [Consultado 13 enero 2026]. <https://www.mdpi.com/2313-7673/8/5/418>
24. PENG, Zhongbo, et al. Multi-threshold image segmentation of 2D OTSU inland ships based on improved genetic algorithm. *Plos one*, 2023, **18**(8), p. e0290750. [Consultado 9 diciembre 2025]. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0290750>
25. INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P. *Fundamentos de transferencia de calor*. Pearson Educación, 1999.
26. RAMOS, Julio Lázaro, et al. Heat-loss measurement using infrared thermography by multi-threshold analysis. *Applied Thermal Engineering*, 2025, **279**, p. 127433. [Consultado 22 enero 2026]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431125020253>

## Conflictos de interés

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses

## Contribución de los autores

Julio L. Ramos Martínez: recolección de datos, procesamiento de las imágenes, cálculo y redacción de artículo.

Yudith González Díaz: revisión crítica y corrección del artículo.

Harold Crespo Sariol: recolección de datos, curación de datos, análisis, revisión crítica y corrección del artículo.

David Cambara González: curación de datos y análisis.