

Algoritmo para medición del crecimiento de escarcha en bancos de tubos con flujo cruzado

G. Rubio-Gómez, S. Martínez-Martínez*, H.G. Ramírez-Hernández, M. García-Yera, F.A. Sánchez-Cruz

Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME)

Laboratory for Research and Innovation in Energy Technology (LIITE)

Av. Universidad s/n. Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, C.P. 66455, México

*simon.martinez@uanl.edu.mx

Resumen

Una de las limitaciones de los intercambiadores de calor utilizados en sistemas de refrigeración que trabajan a una temperatura inferior a la de congelación del agua es la formación de escarcha sobre su superficie. La escarcha provoca una reducción de su rendimiento debido al aumento de la resistencia térmica de la pared y a la caída de presión por obstrucción de los conductos. Uno de los parámetros principales a tener en cuenta para evaluar el impacto de la formación de escarcha es su grosor. La formación de escarcha ha sido estudiada principalmente sobre superficies planas, observándose una carencia de estudios experimentales de formación de escarcha en intercambiadores de bancos de tubos. En este trabajo se propone un novedoso algoritmo para la medición automática del grosor de la escarcha formada sobre un banco de tubos, a partir de imágenes de la escarcha formada y mediante técnicas de visión por computador.

Abstract

One of the main limitations of heat exchangers used in refrigeration which work at a surface temperature below the freezing point of water is frost formation on its surface. Frost causes a decrease in its performance due to changes in thermal conductivity and pressure drops. One of the main parameters to take into account related to frost is its thickness. Frost formation has been deeply investigated on plain surfaces while there is still a lack of information about frost formation on cylindrical surfaces like tubes. This work proposes a novel algorithm for automatic measurement of the frost thickness over tube banks, by means of the application of image processing techniques to frost images.

Palabras clave:

Crecimiento de escarcha, banco de tubos, tratamiento de imágenes, visión por computador, detección automática de contornos, perfil de luminosidad

Keywords:

Frost formation, tube banks, image processing, computer vision, contour automatic detection, luminosity profiles

Nomenclatura

S_T – Espacio transversal [m].

S_L – Espacio Longitudinal [m].

d – Diámetro [m]

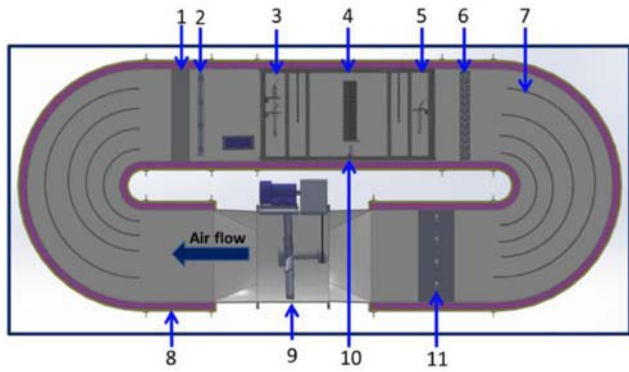
Introduction

Cuando los intercambiadores de calor utilizados en sistemas de refrigeración y en bombas de calor operan con temperatura superficial por debajo del punto de congelación del agua, ocurre la deposición de escarcha sobre la superficie, este fenómeno provoca que se reduzca el desempeño térmico e hidráulico del dispositivo (i.e. aumento de la resistencia térmica y la caída de presión) [1, 2, 3, 4]. Este fenómeno se ha estudiado arduamente para conocer sus propiedades y así diseñar métodos de remoción de escarcha eficaces que consuman la menor cantidad de energía posible y que no afecten en gran medida el desempeño del intercambiador de calor. Las propiedades de mayor importancia son el espesor de la escarcha y la densidad. El espesor de la escarcha es un parámetro muy importante debido a que provoca la reducción del

flujo de aire debido al bloqueo que ocurre conforme crece el espesor, además de que experimentalmente se relaciona con el cálculo de la densidad $\rho = m/V$. [5]. La densidad de la escarcha es un parámetro fundamental debido a su impacto en el valor de otros parámetros de alta importancia como, la porosidad, la conductividad térmica y la difusividad molecular. [5]. La temperatura superficial de la escarcha y el Número de Nusselt promedio son otros parámetros de alta relevancia para conocer a detalle el fenómeno físico [6].

En la revisión bibliográfica realizada sólo se encontró un trabajo que trata el problema de la formación de escarcha en un banco de tubos, V. Yadav et al. [7] modelan la formación de escarcha en un banco de tubos formado por 4 tubos alineados. Dado que se trata de un trabajo de modelado que no conlleva experimentación, resulta de gran interés la realización de ensayos en los que se mida de forma experimental el crecimiento de la escarcha en evaporadores del tipo banco de tubos. Con base en lo anterior, se observa la necesidad de desarrollar un método que permita cuantificar de forma precisa y automatizada el grosor de la escarcha formada durante los experimentos a partir de fotografías de la evolución de la misma.

Instalación experimental



- | | |
|---|--|
| 1. Rectificador de flujo | 6. Evaporador de enfriamiento |
| 2. Humidificador | 7. Guías de flujo |
| 3. Zona de medición a la entrada: temperatura, velocidad, humedad | 8. Aislamiento térmico: 2" |
| 4. Zona de Prueba(80 cm x 100 cm) | 9. Ventilador |
| 5. Zona de medición a la salida: temperatura y humedad | 10. Sensor de temperatura infrarrojo |
| | 11. Resistencias eléctricas de calefacción |

Figura 1: Calorímetro tipo túnel de viento.

A continuación se describe la instalación experimental de donde se obtienen las imágenes a partir de las cuales se desarrolla el algoritmo. Ésta consiste en un calorímetro tipo Túnel de Viento (ver Figura 1), en donde se controlan las propiedades termodinámicas de la corriente de aire, esto es, temperatura y humedad. Además, se tiene la capacidad de modular la velocidad promedio del aire. El calorímetro controla la temperatura mediante un sistema de refrigeración instalado en la posición (6) de la Figura 1 y una resistencia eléctrica de calentamiento que se muestra en (11). Para el control de humedad se tiene instalado un humidificador que consiste en un tanque lleno de agua en donde se encuentra embebida una resistencia eléctrica de 3kW para su evaporación, el vapor generado se inyecta a la corriente de aire del túnel de viento. La velocidad promedio del flujo de aire se controla mediante un regulador PID, realimentado por la señal de un anemómetro, y que actúa sobre la velocidad de un ventilador.

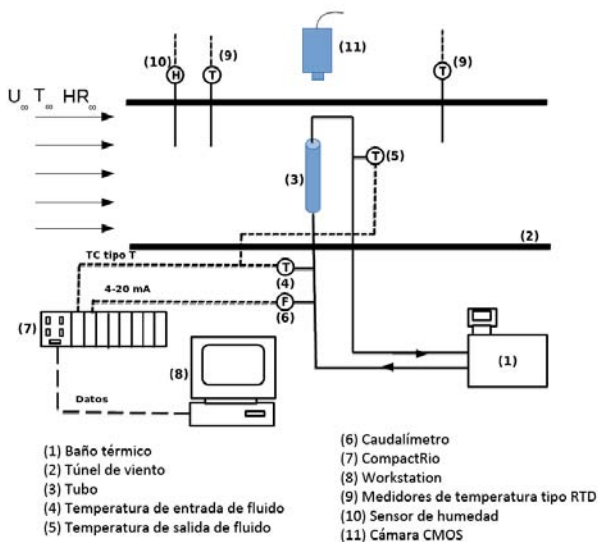


Figura 2: Esquema de la instalación experimental para el estudio.

La instalación experimental cuenta con un CompactRIO modelo NI-CRIO-9024 que tiene la función de controlar las variables antes mencionadas y adquirir variables como temperatura a la entrada y salida del banco de tubos y sección de prueba así como humedad a la entrada y salida de la sección de prueba. En la Figura 2 se muestra un esquema de la instalación. El fluido refrigerante utilizado en el experimento fue etilenglicol mezclado con agua en una proporción del 50%, que se mantiene a una temperatura constante y controlada durante el ensayo. Para registrar el crecimiento de la escarcha se toman fotografías mediante una cámara Nikon D3300, con resolución 6000x4000 píxeles. Esta se alinea a cada tubo de interés mediante un sistema de posicionamiento tipo *Traverse*, ver Figura 3.

Para el estudio se construyó un banco de tubos fabricado en cobre. El banco tiene una construcción tal que permite que el fluido refrigerante fluya por todas las superficies internas de cada tubo, asegurando así una temperatura baja en la superficie exterior y la consiguiente formación de escarcha.

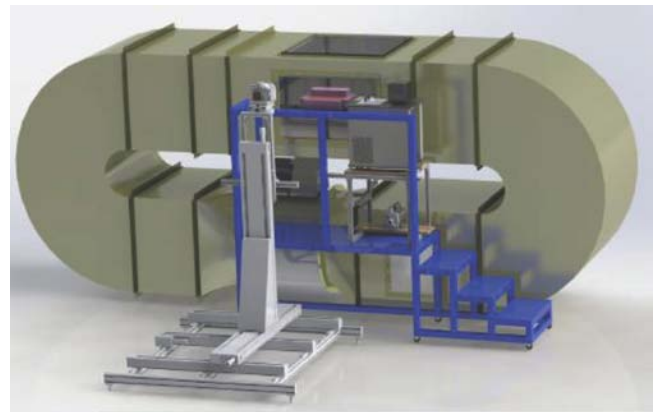


Figura 3: Instalación completa del calorímetro tipo túnel de viento.

En la Figura 4 se muestra un esquema del banco de tubos, el cual consiste en 16 tubos de 0.5 in. situados de forma equidistante, tal y como se muestra en la Figura 4. La separación entre tubos es $S_T = S_L = 1in$.

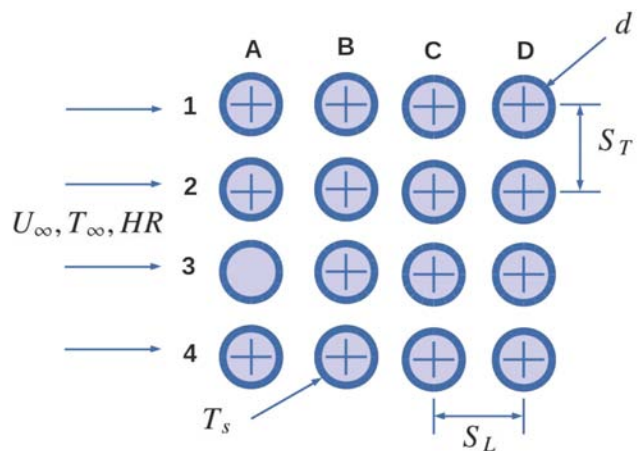


Figura 4: Esquema del banco de tubos y nomenclatura.

Metodología y adquisición de imágenes

Cada experimento comienza con la estabilización del calorímetro, la temperatura y humedad del aire. Paralelamente, el baño térmico se pone a funcionar en el setting que le corresponda al experimento. Cuando ambos equipos se encuentran listos, se realiza la apertura de las válvulas adecuadas para que comience a circular el fluido refrigerante por el banco de tubos, produciendo así una temperatura superficial que promueve el inicio de la formación de escarcha. Al inicio del fenómeno se toman fotografías de cada uno de los tubos, aun sin escarcha sobre su superficie, teniendo especial cuidado en la alineación del tubo con el lente de la cámara. El crecimiento de la escarcha en la dirección radial en cada tubo se registra mediante fotografías tomadas con 10 minutos de diferencia.

Algoritmo de análisis de imagen desarrollado

En esta sección se explica el algoritmo desarrollado para la medida automática de la formación de escarcha en bancos de tubos. El algoritmo ha sido desarrollado en el entorno Matlab® y con la utilización de la librería de procesamiento de imágenes *Image Processing Toolbox*™. El objetivo del algoritmo propuesto es la medición del crecimiento de escarcha en cada una de las imágenes de todos los tubos que se generan durante un ensayo experimental. En la Figura 5 se muestra el diagrama de flujo del código que implementa el algoritmo desarrollado.

Mediante el algoritmo desarrollado se consigue determinar qué píxeles de las imágenes obtenidas corresponden a la escarcha formada, para separarlos así de aquellos que corresponden al fondo de la imagen o al propio tubo. Esto se consigue mediante el cálculo automático de un umbral de luminosidad, de forma que se considera que, tras un pretratamiento de la imagen, los píxeles con una intensidad luminosa superior al umbral pertenecen a la escarcha, mientras que aquellos con una intensidad inferior corresponden al tubo o al fondo de la imagen. Esta técnica es también conocida como binarización, ya que el resultado es una imagen cuyos píxeles solo tienen dos niveles posibles, alto (correspondiente a escarcha) o bajo (correspondiente al tubo o al fondo de la imagen), muy utilizada en detección y análisis de objetos[8].

Las imágenes a procesar se dividen en 72 sectores circulares de 5° de amplitud cada uno, con origen en el centro del tubo. En la Figura 6 se observan los sectores de análisis sobre una imagen de referencia sin escarcha.

El proceso de cálculo automático del umbral de luminosidad y posterior binarización se lleva a cabo para cada uno de estos sectores y en todas las imágenes con escarcha obtenidas para cada uno de los tubos de los que consta el banco. Se consideran imágenes con escarcha todas las correspondientes a un tubo excepto la tomada al comienzo del ensayo, que se utiliza como referencia para la detección automática del tubo. El cálculo del umbral de luminosidad se realiza a partir

del análisis del perfil de luminosidad en la dirección radial por el centro del sector correspondiente. El uso de perfiles de luminosidad es una metodología muy empleada en procesamiento de imágenes de carácter general para la detección de contornos [9, 10].

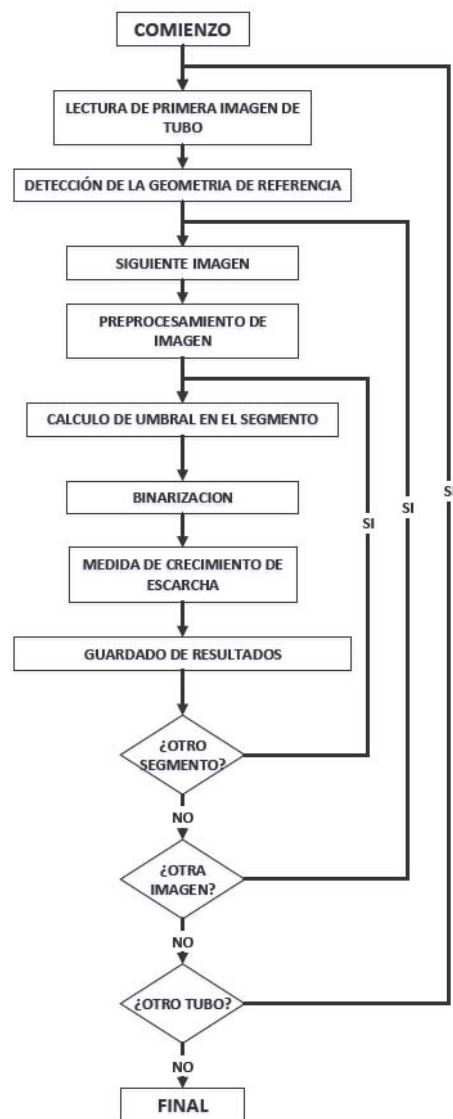


Figura 5: Diagrama de flujo del código desarrollado

Gracias al cálculo del umbral de binarización de forma independiente para cada uno de los segmentos de las imágenes se consigue que el algoritmo sea robusto frente a variaciones en la luminosidad entre las distintas regiones de los tubos, entre la misma región con el paso del tiempo, debido a sombras que pueden producirse por la formación de escarcha y entre distintos tubos. A continuación se explica detalladamente el algoritmo desarrollado.

Detección de la geometría de referencia

Para la medición del crecimiento de escarcha es necesario conocer el área de la imagen en la que se encuentra el tubo. La distancia de crecimiento de escarcha será aquella medida

en la dirección radial desde el final del tubo hasta el contorno de la escarcha, para cada uno de los segmentos de análisis. La detección del área correspondiente al tubo se lleva a cabo a partir de la primera imagen de cada uno de los tubos, tomada al comienzo del ensayo y por tanto sin escarcha sobre su superficie.

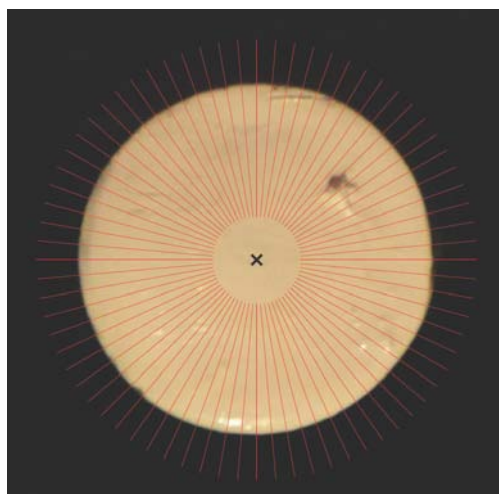


Figura 6: Sectores en los que se dividen las imágenes para su análisis

Las imágenes adquiridas están en formato RGB y tienen una profundidad de 24bits, 8 bits para cada canal de color.

En primer lugar se realiza la conversión de la imagen en formato RGB a escala de grises, en el que cada píxel toma un valor comprendido entre 0 (negro puro) y 255 (blanco puro), mediante la suma ponderada de los canales rojo, verde y azul, según la Ecuación 1.

$$I_{gray}(x, y) = 0,299 \cdot I_r(x, y) + 0,587 \cdot I_v(x, y) + 0,114 \cdot I_a(x, y) \quad (1)$$

dónde $I_{gray}(x, y)$, $I_r(x, y)$, $I_v(x, y)$, $I_a(x, y)$, son los valores del píxel en coordenadas (x, y) de la imagen en escala de grises y de los canales rojo, verde y azul de la imagen en formato RGB, respectivamente. Los coeficientes de la suma son los utilizados en la función para conversión de RGB a escala de grises de la librería de procesamiento de imágenes utilizada y corresponden con los recomendados en [11] tras el redondeo a tres cifras decimales.

La detección del tubo se ve simplificada en gran medida por el hecho de que éste tiene un color blanco y se encuentra sobre un fondo oscuro, por lo que se binariza mediante el umbral de luminosidad calculado por el método de Otsu [12], uno de los más utilizados para la binarización de imágenes de carácter general. El código desarrollado utiliza la implementación del método incluido en la librería *Image Processing Toolbox*TM para el cálculo de este umbral. Una vez obtenida la imagen del tubo sin escarcha binarizada, se rellenan los posibles huecos que pudieran haber quedado tras la binarización, esto es, cualquier isla con píxeles en nivel bajo totalmente rodeada de píxeles en nivel alto. En la Figura 7 se muestra el resultado del proceso descrito.

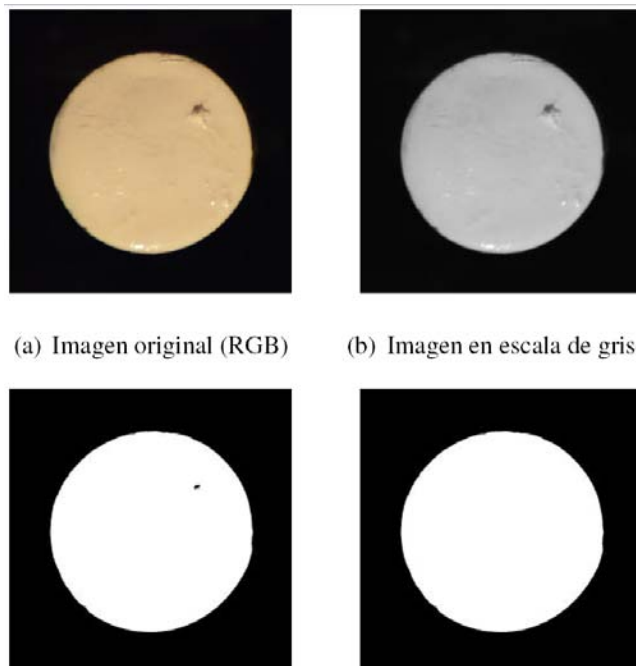


Figura 7: Procesamiento de imagen de referencia sin escarcha

Los puntos del contorno de la imagen binarizada, se utilizan para ajustar una circunferencia, cuyo centro es el centroide geométrico de la misma. Esta circunferencia se considera como la geometría de referencia a partir de la cual se medirá la formación de escarcha. La circunferencia calculada se muestra sobre la imagen original del tubo en la Figura 8.



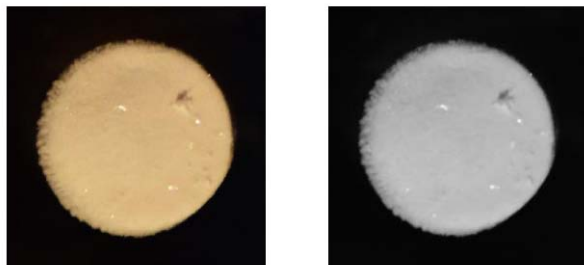
Figura 8: Imagen del tubo sin escarcha y geometría de referencia calculada

Preprocesamiento de imágenes con escarcha

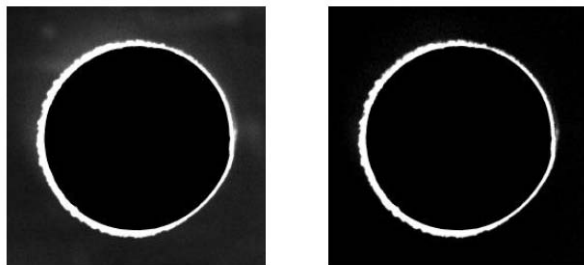
Una vez obtenida la geometría de referencia, se procede al procesamiento de las siguientes imágenes de cada tubo, en las que se presenta formación de escarcha. El primer paso, al igual que con la imagen sin escarcha, es la conversión de la imagen original en formato RGB a escala de grises, mediante el método explicado anteriormente. Este algoritmo tiene por objetivo la medición de la escarcha formada

en los laterales del tubo, no en su parte frontal, por lo que se procede a la eliminación del área de referencia detectada anteriormente. Para ello, se asigna un valor de 0 (negro) a los píxeles correspondientes a la misma. Adicionalmente, se lleva a cabo la eliminación del fondo de la imagen. Esto se hace mediante la sustracción de la zona no correspondiente al tubo de la imagen de referencia a la imagen con escarcha. La técnica de sustracción del fondo es frecuentemente utilizada en la detección de objetos que aparecen sobre un fondo del que se tienen imágenes anteriores [13], como es este caso. Como resultado, el objeto de interés que apareció de forma posterior en la imagen queda destacado, facilitando su detección al corresponder los perfiles de luminosidad de la imagen únicamente a éste. En la Figura 9 se muestra el resultado del proceso descrito.

Las imágenes correspondientes al resultado de la eliminación del tubo y de la eliminación del fondo se muestran con cinco veces más luminosidad para hacer posible la apreciación del efecto de la sustracción del fondo. Por último, el contraste de la imagen es incrementado con objeto de amplificar los gradientes luminosos y así facilitar el posterior cálculo automático del umbral de binarización.



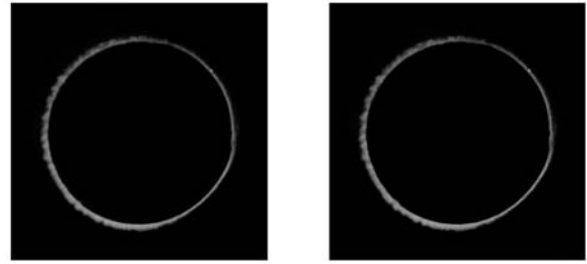
(a) Imagen con escarcha original (b) Imagen con escarcha en escala de grises



(c) Resultado de eliminación de tubo (luminosidad x5) (d) Resultado de eliminación del fondo (luminosidad x5)

Figura 9: Preprocesamiento de imagen con escarcha

El método utilizado para este aumento de contraste es el de la "mascara distorsionada", que consiste en sustraer de la imagen una versión distorsionada de la misma [14] y que es implementado por la librería *Image Processing Toolbox*TM. En la Figura 10 se muestra el resultado del aumento de contraste.



(a) Resultado de la eliminación del fondo (luminosidad x1) (b) Resultado de aumento de contraste (luminosidad x1)

Figura 10: Aumento de contraste

Detección de contorno de escarcha y medición del crecimiento

Para la medición del crecimiento de escarcha se procede a la detección de su contorno, mediante la binarización de la parte de la imagen resultante del preprocesamiento en la que se encuentra la escarcha que se ha formado. Para esto, se calcula de forma automática un umbral de luminosidad para cada uno de los segmentos en que se dividen las imágenes. Los umbrales de luminosidad se calculan a partir del análisis de los perfiles de luminosidad en la dirección radial y a través del centro de los segmentos. En la Figura 11 se muestran los segmentos de división junto con las líneas a través de las cuales se analizará el perfil de luminosidad sobre una imagen con escarcha después del preprocesamiento.

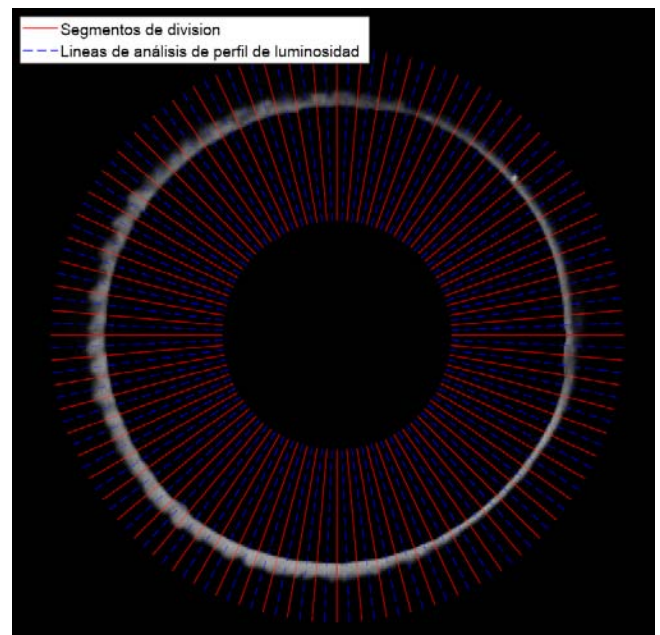


Figura 11: Segmentos de división y perfiles de análisis de luminosidad

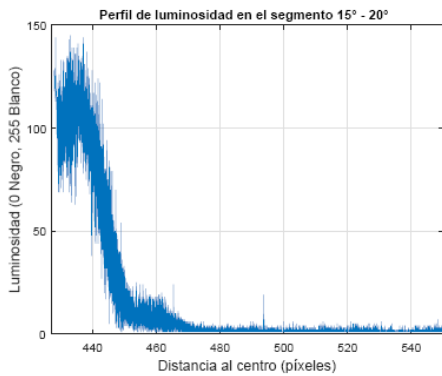
En la Figura 12 se pueden observar los perfiles de luminosidad obtenidos para dos de los segmentos mostrados anteriormente. A modo ilustrativo, se muestra un perfil correspondiente al segmento con mayor grosor de escarcha, segmento 225°-230° y otro al de menor grosor, 15°-20°.

A la vista de estos perfiles de luminosidad, se observa claramente un fuerte descenso que coincide con la localización del contorno de la escarcha. Nótese como dos perfiles en ángulos distintos tienen tendencias muy similares, produciéndose el descenso a una mayor distancia del centro en el caso de mayor grosor de escarcha.

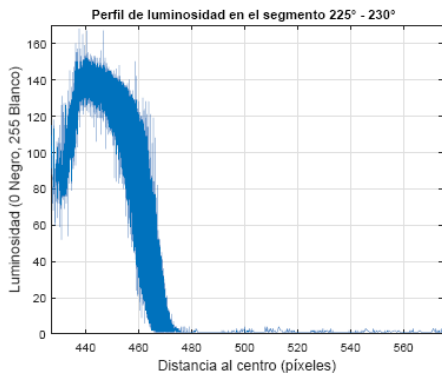
Para facilitar el tratamiento de los datos, se debe eliminar el ruido que se observa y que es debido a ligeras variaciones aleatorias de la luminosidad. Para esto se aplica un filtro tipo media móvil [15] para suavizar la señal, manteniendo la tendencia general en la que se incluye el brusco descenso que se quiere detectar. El filtro de media móvil es de los más simples e intuitivos que se emplean para suavizado de señales y se define mediante la Ecuación 2.

$$X_i = \frac{1}{n} \sum_{k=i-n/2}^{i+n/2} X_k \quad (2)$$

dónde n es el tamaño de la ventana del filtro. Se observó que calculando este tamaño como el número de elementos de la señal dividido entre 20 se obtenían resultados de suavizado satisfactorios. En la Figura 13, se muestra el resultado de la aplicación del filtro de media móvil definido a las señales de la Figura 12.



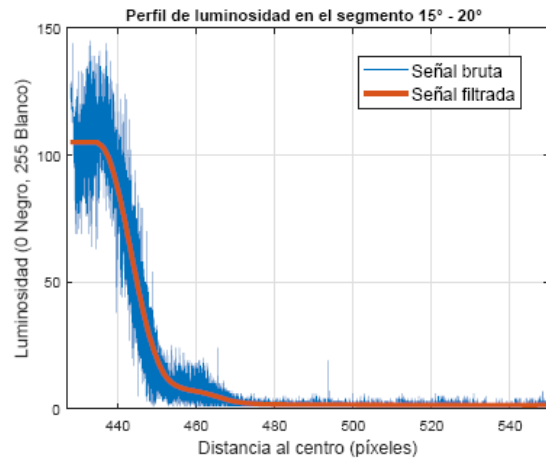
(a) Perfil de luminosidad de segmento 15° – 20°



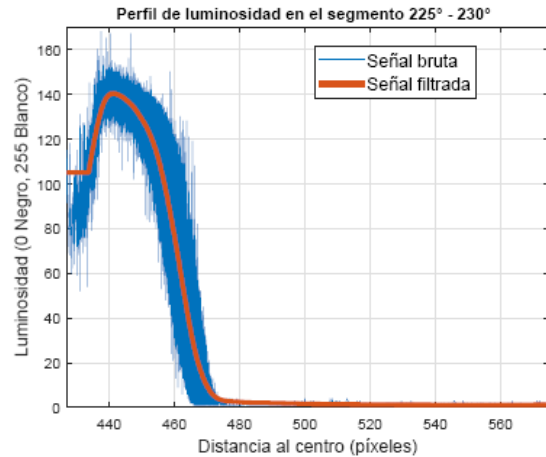
(b) Perfil de luminosidad de segmento 225° – 230°

Figura 12: Perfiles de luminosidad a lo largo de distintas líneas de análisis

Para la detección automática del punto donde se encuentra el contorno de la escarcha se recurre a la derivada del perfil de luminosidad, sobre la que también se aplica el filtro de media móvil definido anteriormente. En la Figura 14 se observan las derivadas de los perfiles de luminosidad, en su forma bruta y el resultado tras la aplicación del filtro.



(a) Perfil de luminosidad de segmento 15° – 20°



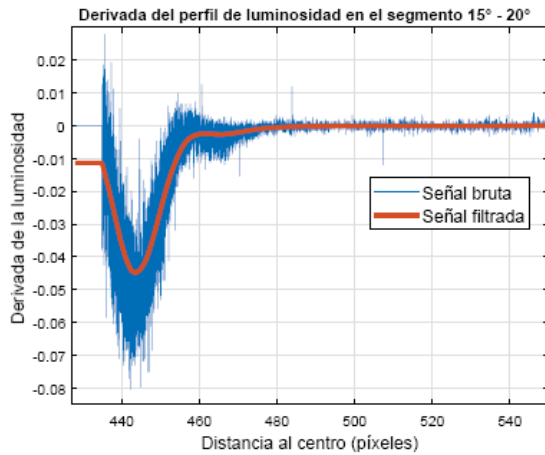
(b) Perfil de luminosidad de segmento 225° – 230°

Figura 13: Resultados del filtro aplicado al perfil de luminosidad

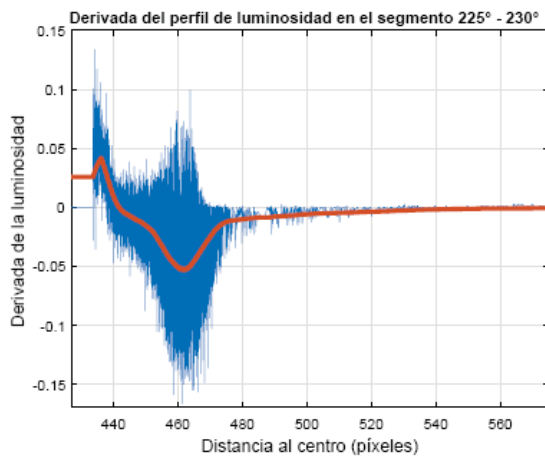
Mediante experimentación, se observó que la distancia al centro correspondiente al contorno de la escarcha en el sector de análisis coincide con el mínimo absoluto de la derivada del perfil de luminosidad en dicho sector. Esto concuerda con el método de detección de contornos propuesto por Canny [9], en el que se utilizan los pasos por cero de la segunda derivada de los perfiles de luminosidad para la detección de contornos. El umbral de luminosidad se calcula como la media de la señal filtrada de luminosidad en un entorno de amplitud 10 píxeles y centrado en el punto donde se obtuvo el mínimo absoluto de su derivada. En la Figura 15 se muestra el punto de detección del contorno y el umbral de luminosidad.

dad calculado mediante el método propuesto.

El umbral de luminosidad calculado para cada segmento se emplea para su binarización. La imagen binarizada de toda la escarcha formada en una determinada imagen se obtiene mediante la adición de las imágenes binarizadas de cada segmento. En la Figura 16 se muestran la binarización de los segmentos empleados para ilustrar el método desarrollado así como la imagen binarizada de toda la escarcha tras la aplicación del método a todos los segmentos.



(a) Derivada del perfil de luminosidad en el segmento 15° – 20°



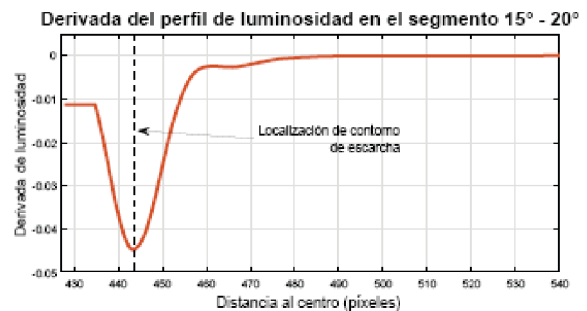
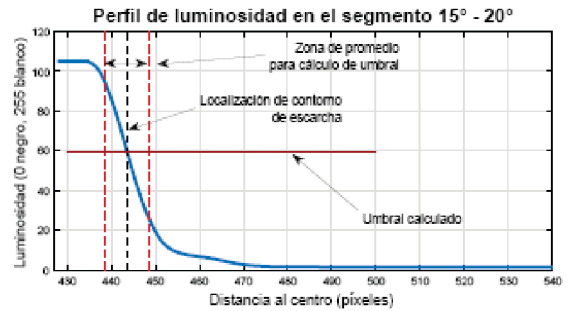
(b) Derivada del perfil de luminosidad en el segmento 225° – 230°

Figura 14: Derivada de los perfiles de luminosidad a lo largo de distintas líneas de análisis

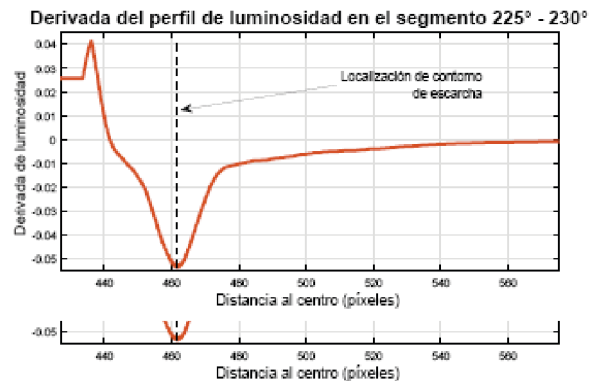
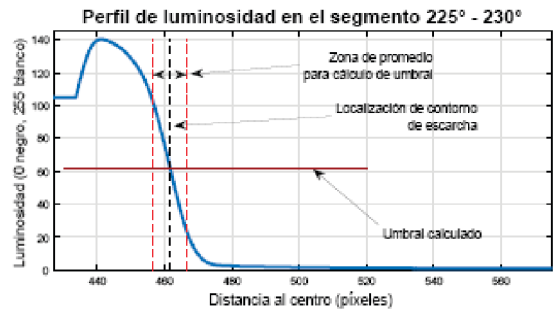
A partir de la imagen con la escarcha binarizada se procede al cálculo del crecimiento de escarcha. Esto se realiza midiendo la distancia desde la circunferencia de referencia hasta el contorno de la escarcha, en la dirección radial y con una resolución de 1°, tal y como se muestra en la Figura 17.

Validación del algoritmo desarrollado

Para conocer la validez del algoritmo de medición de crecimiento de escarcha propuesto se ha realizado un ejercicio de calibración que consiste en la impresión de un círculo con las dimensiones exactas del diámetro externo del tubo que se utiliza en los experimentos y otro con un radio de dos milímetros superior al original. Ambos cilindros se fotografiaron y se analizaron mediante el algoritmo propuesto.



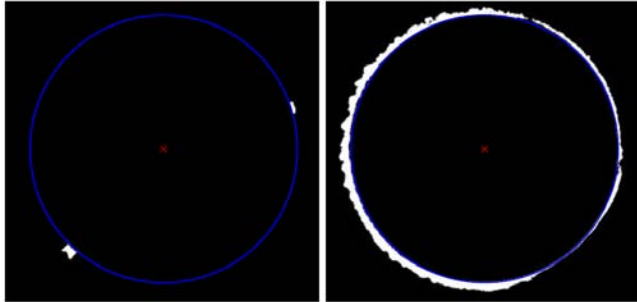
(a) Segmento 15° – 20°



(b) Segmento 225° – 230°

Figura 15: Umbral de luminosidad calculado para distintas líneas de análisis

La Figura 18(a) muestra las imágenes de los dos círculos mencionados, en la Figura 18(b) se muestra un gráfico radial en donde la línea verde representa el radio del primer círculo, es decir el diámetro de la imagen base, la línea azul representa el radio real del círculo mayor y la línea roja representa el perfil medido mediante el algoritmo propuesto. Además, en la Figura 18(c) se muestra el radio medido y el radio real con respecto a la posición angular.



(a) Binarización de los segmentos $15^\circ - 20^\circ$ y $225^\circ - 230^\circ$ (b) Escarcha binarizada

Figura 16: Resultados de la binarización con el umbral calculado

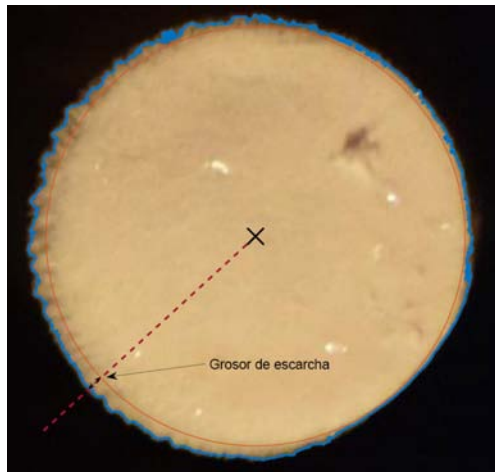


Figura 17: Contorno de la escarcha detectada y medición de su grosor

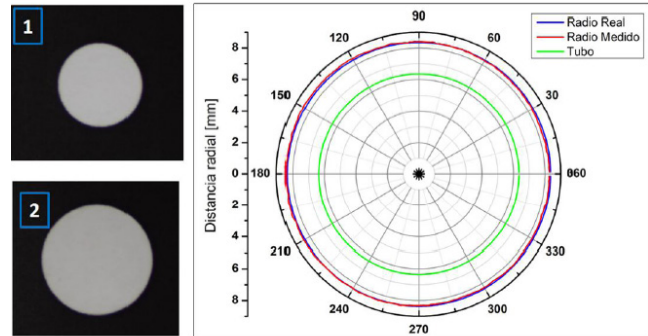
Se encontró que la diferencia máxima fue de 0.147 mm, que corresponde a un error del 7.3%. La diferencia promedio es de 0.066 mm, lo cual representa un error promedio del 3.3%.

5. Resultados

En el experimento expuesto en este trabajo se mantuvo una temperatura superficial en el banco de tubos de $T_s = -8^\circ \text{C}$, una humedad relativa de $HR = 60\%$, y una velocidad promedio de la corriente de aire húmedo de $U_\infty = 1 \text{ m/s}$. A continuación se muestran los resultados obtenidos mediante el algoritmo propuesto.

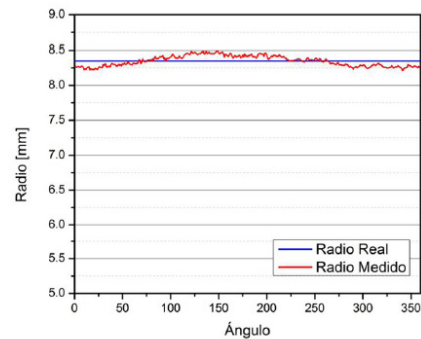
En la Figura 19 se realiza una comparación cualitativa entre una de las fotografías del tubo frontal sin escarcha con la construcción de la circunferencia mediante el algoritmo y los contornos de la escarcha detectados a lo largo de su crecimiento. A pesar de la existencia de algunas sombras que no permiten visualizar por completo la circunferencia del tubo,

con el algoritmo propuesto está se logra construir exitosamente. En la Figura 19(b) se muestra una comparación cualitativa entre la fotografía del tubo escarchado al final del experimento y los contornos de escarcha detectados mediante el algoritmo propuesto, se observa que al menos en un 90% de la fotografía, el gráfico sigue correctamente el patrón de crecimiento de la escarcha.



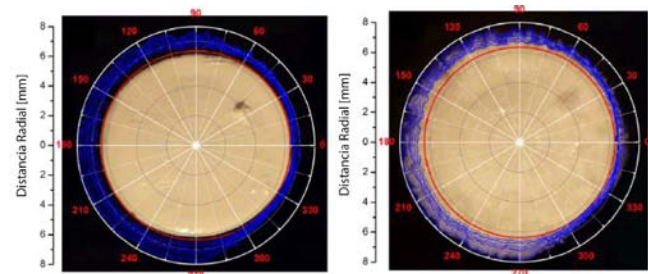
(a)

(b)



(c)

Figura 18: Resultados de validación del algoritmo propuesto



(a)

(b)

Figura 19: Resultados de validación del algoritmo propuesto

6. Conclusiones

En el presente trabajo se ha propuesto un novedoso algoritmo para la medición de forma automática de la formación de escarcha en bancos de tubos, a partir de imágenes tomadas en experimentos en los que se produce esta formación de escarcha. El algoritmo analiza los perfiles de luminosidad en la dirección radial a través de 72 sectores para cada fotografía, y basándose en la derivada de los mismos, determina un umbral de binarización diferente para cada sector. De esta forma se consigue segmentar la parte de la imagen

correspondiente a la escarcha y con ello medir la evolución de su grosor, parámetro fundamental en el desempeño de este intercambiadores de calor con esta geometría. La capacidad del algoritmo de medir el grosor de la escarcha fue validada mediante imágenes con grosor conocido, determinándose un error máximo del 7.3% y promedio de 3.3%.

Referencias

- [1] D. Seker, H. Karatas, N. Egrican, *Frost formation on fin-and-tube heat exchangers. part i - modeling of frost formation on fin-and-tube heat exchangers*, International Journal of Refrigeration 27 (4) (2004) 367 – 374.
- [2] M. Fossa, G. Tanda, *Frost formation in vertical channels under natural convection*, International Journal of Multiphase Flow 36 (3) (2010) 210 – 220.
- [3] C. H. Cheng, K. H. Wu, *Observations of early-stage frost formation on a cold plate in atmospheric air flow*, Journal of Heat Transfer-Transactions of the Asme 125 (1) 95–102. doi:10.1115/1.1513576.
- [4] J. Irarorrry, Y. Tao, *Frost temperature relations for defrosting sensing system*, Journal of Heat Transfer 127 (3) (2005) 344 – 351.
- [5] A. Leoni, M. Mondot, F. Durier, R. Revellin, P. Haberschill, *State-of-the-art review of frost deposition on flat surfaces*, International Journal of Refrigeration-Revue Internationale Du Froid 68 198– 217. doi:10.1016/j.jrefrig.2016.04.004.
- [6] J. Irarorrry, Y.-X. Tao, S. Jia, Review article: *A critical review of properties and models for frost formation analysis*, HVAC&R Research 10 (4) (2004) 393–420. doi:10.1080/10789669.2004.10391111.
- [7] C. M. y. K. K. V. Yadav, *Modeling frost growth for subcooled tube-array configurations.*, Journal of Heat Transfer 131.
- [8] M. Sezgin, et al., *Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation*, Journal of Electronic imaging 13 (1) (2004) 146–168.
- [9] J. Canny, *A computational approach to edge detection*, IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence (6) (1986) 679–698.
- [10] J. S. Lim, *Two-dimensional signal and image processing*, Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 1990, 710 p.
- [11] I. T. Union, Recommendation itu-r bt.601-7 (03/2011). *studio encoding parameters of digital television for standard 4:3 and wide-screen 16:9 aspect ratios*, iTU-R BT.601-7 (03/2011) (Mar. 10 2011).
- [12] N. Otsu, *A threshold selection method from graylevel histograms*, Automatica 11 (285-296) (1975) 23–27.
- [13] M. Piccardi, *Background subtraction techniques: a review*, in: *Systems, man and cybernetics*, 2004 IEEE international conference on, Vol. 4, IEEE, 2004, pp. 3099–3104.
- [14] A. Polesel, G. Ramponi, V. J. Mathews, *Image enhancement via adaptive unsharp masking*, IEEE transactions on image processing 9 (3) (2000) 505–510.
- [15] Y.-I. Chou, *Statistical analysis*, JSTOR, 1963.