

# Intensificación de la transferencia de calor en ebullición convectiva

## Intensification of heat transfer in convective boiling

José Luis Ramírez Duque<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Doctor en Ciencias con énfasis en Ingeniería Mecánica de Energía y Fluidos, Pontificia Universidad Javeriana, Cali, Colombia, e-mail: [joslurad@gmail.com](mailto:joslurad@gmail.com)

Fecha de recepción: 03/22/2018 Fecha de aceptación: 10/10/2018



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No comercial-SinObraDerivada 4.0 internacional.

DOI: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.1327>

**Como citar:** Ramírez Duque, J. L. (2018). Intensificación de la transferencia de calor en ebullición convectiva. AVANCES: INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA, 15, 86-102. DOI: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.1327>

### Resumen

Los procesos de cambio de fase en flujos en ebullición son procesos que tienen mayores coeficientes de película que los casos que involucran fluidos monofásicos. Existe un crecimiento exponencial de la demanda de eficiencia de los sistemas térmicos, especialmente para las aplicaciones de refrigeración, aire acondicionado y generación de energía por vapor. Esto se debe a los aumentos en los precios de combustibles y al aumento de normas en el uso eficiente de la energía como consecuencia del cambio climático y los ahorros en infraestructura energética. Dado el creciente interés en las últimas décadas en las técnicas de intensificación de calor, el presente trabajo muestra las técnicas pasivas y activas más utilizadas en la intensificación de calor que son utilizadas para mejorar el intercambio de calor mediante ebullición convectiva.

Palabras clave: Eficiencia energética, fenómenos convectivos, intercambiadores de calor, intensificación de transferencia de calor.

### Abstract

The processes of phase change in boiling streams are those have higher film coefficients than the cases that involve single-phase fluids. There is an exponential growth in the demand for the efficiency of thermal systems, especially for applications of refrigeration, air conditioning and steam power generation. This is due to increases in fuel

prices and the increase of standards in the efficient use of energy, as a consequence of climate change and savings in energy infrastructure. Given the growing interest in the techniques of heat intensification in the last decades, the present work shows the passive and active techniques most used in the intensification of heat that are used to improve the heat exchange through convective boiling.

Keywords: Energy efficiency, convective phenomena, heat exchangers, heat transfer enhancement.

## Introducción

Los procesos de cambio de fase son de gran interés en la industria debido a sus infinitas aplicaciones. Para mencionar algunas de ellas, podemos referirnos a los procesos de ebullición en calderas, expansión de vapor en una turbina, evaporación de refrigerantes en sistemas de refrigeración, entre muchos otros [1].

Aunque los sistemas de intercambio de calor que trabajan con flujos que cambian de fase tienen altos coeficientes de película en comparación con equipos de intercambio de calor con flujos de una sola fase, muchas tecnologías están actualmente en desarrollo en el laboratorio, que son prometedoras e interesantes pensando a un futuro próximo, debido a sus impactos sobre el rendimiento energético, reducción de tamaño y costo de los equipos [2].

La eficiencia de los intercambiadores de calor depende del tipo de material empleado. Hoy en día existe un avance tecnológico en el tipo de materiales que se utilizan para este propósito, los cuales cuentan con ciertas ventajas con respecto a otros materiales tradicionales. Los materiales empleados actualmente permiten que se tenga un menor peso

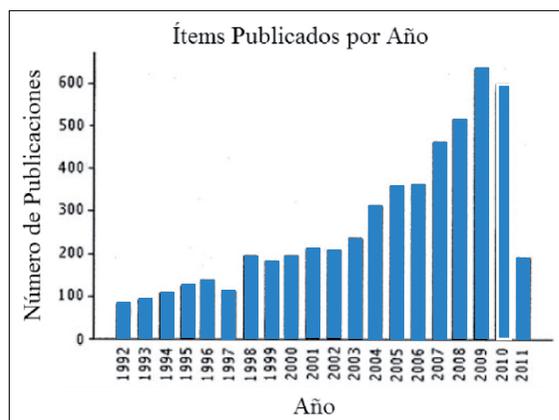
en un mismo volumen, que se absorba más calor por unidad de volumen y en general que se contribuya al ahorro de energía convencional. Es de resaltar que la intensificación de transferencia de calor ayuda a controlar las condiciones térmicas de los equipos, que, junto con el ahorro de energía y materiales constructivos, son determinantes en el desempeño de los sistemas de intercambio de calor [3].

Los sistemas de intercambio de calor pueden ser encontrados en muchos sistemas químicos o mecánicos, con el objetivo de ganar o rechazar calor en diversos procesos que involucran aplicaciones a nivel residencial, industrial y comercial. Frecuentemente utilizados en aplicaciones de calentamiento, ventilación, sistemas de acondicionamiento de aire acondicionado, calderas, condensadores, radiadores de motores de combustión interna y precalentadores o enfriadores de fluidos [4].

Debido a los problemas energéticos y ambientales de la actualidad [5], se implementó la norma de gestión de la energía ISO 50001 en todo el mundo, que establece como objetivo principal el mejoramiento de los sistemas de gestión de energía en las organizaciones, para

así mejorar la eficiencia energética, la seguridad energética y el uso y consumo de la energía desde un enfoque sistemático [6]. Este uso eficiente de la energía es una necesidad que debe ser aplicada y lograda en todos los sistemas que demanden algún tipo de energía. La tendencia en la investigación del intercambio de calor ya venía tomando fuerza en las últimas décadas, como se puede observar en la Figura 1, con el aumento bibliográfico en esta área, como consecuencia del interés científico global debido a sus múltiples aplicaciones.

Los estudios sobre la intensificación de la transferencia de calor en sistemas con ebullición convectiva son un tema muy importante debido a su relación con el aumento de la competitividad. El ahorro de energía en gran escala puede resultar en una menor inversión del Gobierno en infraestructura para la generación de energía, además de reducir las emisiones, y de la oportunidad de invertir su presupuesto en campos de mayor prioridad. A pesar de



**Figura 1.** Incremento de la literatura científica en la transferencia de calor [7].

que los problemas de la intensificación del intercambio de calor son complejos (en flujos multifásicos), varios estudios experimentales y numéricos se han efectuado en las últimas décadas debido al gran interés producido por las razones citadas anteriormente.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1 Ebullición convectiva

El fluido circula a través de un tubo o conjunto de tubos en el mecanismo de transferencia de calor (ebullición convectiva). Esta ebullición tiene efectos combinados dada la convección y la ebullición en vaso abierto [8]. En la ebullición de flujo interno, no existe una superficie libre donde el vapor pueda escapar, por lo que el líquido y el vapor están juntos como un flujo multifásico, generando diferentes regímenes de ebullición dependiendo de las cantidades relativas de líquido y vapor. Para el caso de la tubería vertical de la Figura 2, pueden ser clasificadas las regiones de desarrollo de flujo de la siguiente manera:

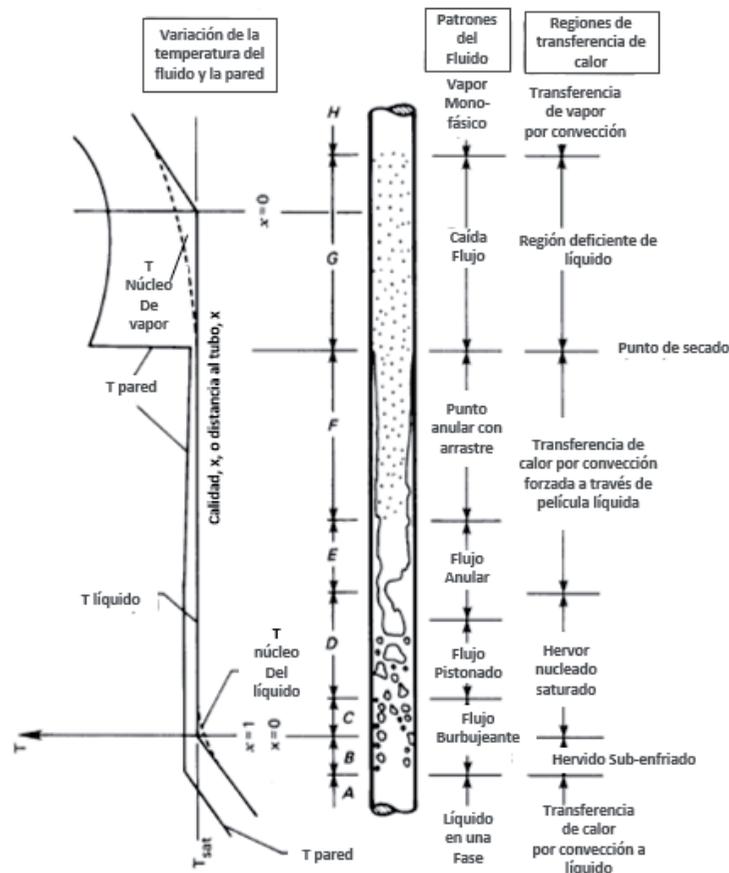
1. Región de flujo de fases simples (A): El líquido está subenfriado y el fenómeno es únicamente convección forzada.
2. Región de burbujeo (B-C): El calentamiento hace que se formen burbujas en la superficie interna de la pared del tubo, que son separadas y arrastradas por la corriente principal.
3. Región de tapón (D): A medida que la fracción volumétrica de vapor aumenta, las burbujas se unen y

forman masas de vapor. En este régimen hasta la mitad del volumen del tubo que es ocupado por vapor.

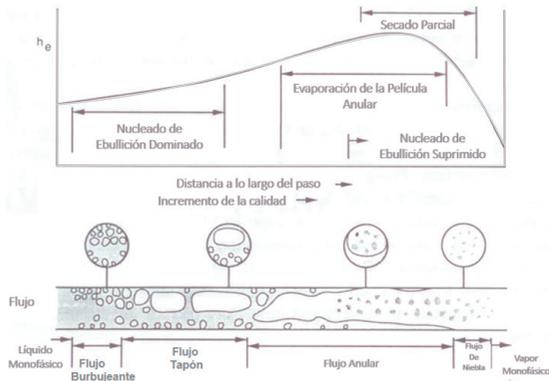
4. Región de flujo anular (E): Después de un tiempo las grandes burbujas se acumulan en el centro del tubo (flujo de calor crítico, o CHF, por sus siglas en inglés), generando un flujo dinámico y altamente turbulento, que tiene un efecto sobre el líquido que está en la superficie interna del tubo. En esta región el coeficiente de película aumenta continuamente.
5. Región de transición (F): La película de líquido se vuelve cada vez más fina

hasta que aparecen puntos secos, y el líquido remanente prácticamente desaparece. El coeficiente de película disminuye drásticamente a consecuencia de las propiedades inferiores para el intercambio de calor del vapor en comparación con el líquido.

6. Región de niebla (G): En el momento en el que el líquido se seca de las paredes del tubo, el líquido en forma de pequeñas gotas está suspendido en el núcleo de vapor, que persiste hasta que todas se hayan convertido en vapor. Este pasa a ser entonces sobrecalentado por la convección forzada en las superficies del tubo.

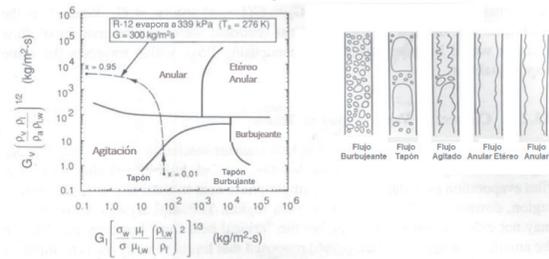


**Figura 2.** Desarrollo del flujo bifásico en el tubo vertical con flujo de calor constante [9].



**Figura 3.** Desarrollo del flujo bifásico en un tubo horizontal con flujo de calor constante [10].

Se puede notar que las regiones antes del flujo burbujeante y después del flujo de niebla son monofásicas, y son tratados con las ecuaciones tradicionales de los cursos de transferencia de calor, estudiadas en los cursos de pregrado en ingeniería. Además, los flujos burbujeantes, de tapón, anular y de niebla, son flujos que necesitan ecuaciones más complejas y funciones de enlace, que exigen el uso de soluciones numéricas que requieren robustos equipos computacionales y muchas horas de procesamiento y posprocesamiento. En el momento es imposible tratar estos tipos de flujo con un único sistema de referencia, por el hecho de que todos los flujos de gas-líquido se rigen por dos sistemas de ecuaciones de Navier-Stokes, uno para cada fase. Para el caso de tubo horizontal (Figura 3) y el proceso de ebullición, es similar con las diferencias de los efectos provocados por la gravedad que generan zonas secas, que son causantes de ineficiencias. El proceso de evaporación de



**Figura 4.** Patrones de ebullición del refrigerante R-12 en un tubo vertical [10].

refrigerante R-12 se muestra mediante un diagrama de fases en la Figura 4.

## 2.2 Intensificación de transferencia de calor en ebullición convectiva

Los siguientes desarrollos se realizaron para mejorar el intercambio de calor en diferentes procesos de evaporación, muchos de ellos en aplicaciones de aire acondicionado, refrigeración y generación de vapor. Muchas de estas técnicas solo pudieron ser desarrolladas después de la década de los sesenta debido a las dificultades de fabricación. Estas tecnologías son relativamente antiguas; en la actualidad se hacen numerosas investigaciones con el fin de mejorar su rendimiento y aplicación de técnicas combinadas. Con el propósito de hacer un tratamiento adecuado de los tópicos, se hace una revisión de los temas en el siguiente orden: aletas internas, tubos con microaletas, dispositivos de desagüe, tubos corrugados, superficies revestidas,

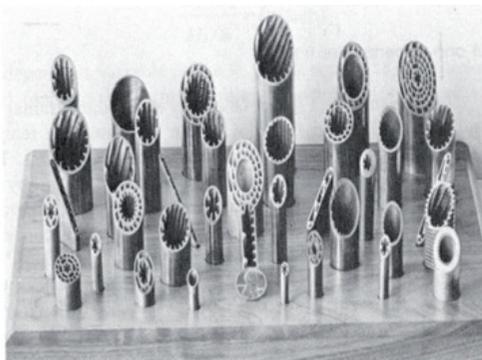
inserciones de láminas perforadas, tubos espiralados y curvas de retorno, vibración, campos eléctricos, acústica y mecanismos combinados.

### 2.2.1 Aletas internas

Son dispositivos utilizados para mejorar la transferencia de calor en flujos multifásicos y monofásicos, sus efectos se relacionan con una disminución del diámetro hidráulico en los tubos y una mayor área de la transferencia de calor. Esta tecnología no tiene muchos efectos sobre los fenómenos de la nucleación, mas tiene un considerable aumento en la convección de los fluidos multifásicos, en tanto que tiene un considerable incremento en el flujo secundario. En la Figura 5 se muestran algunos perfiles estudiados en la literatura. En la Figura



**Figura 5.** Nadadora interior tubos para evaporadores frigoríficos: (a) inserción de *strip-fin*, (b) inserción en forma de estrella [11].



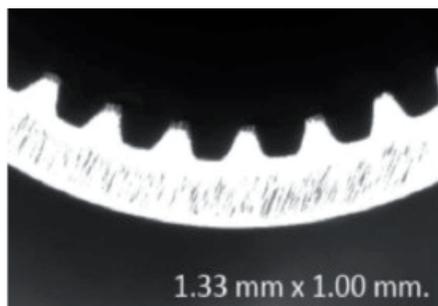
**Figura 6.** Tubos secos comerciales [9].

6 se enseñan tubos con aletas internas comerciales.

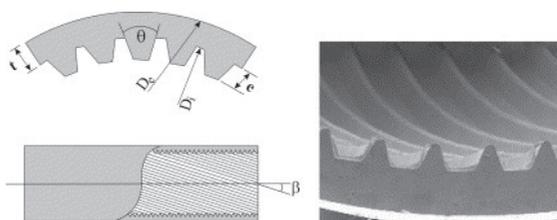
### 2.2.2 Tubos con microaletas

Los tubos con microaletas son usualmente usados en las aplicaciones de aire acondicionado y refrigeración. Para mejorar el desempeño de los intercambiadores de calor aleteados, la mayoría de las veces son tubos horizontales. Múltiples estudios muestran los incrementos del intercambio de calor. Yoshida et al. [12] pudieron medir que el coeficiente de película de R-22 con un flujo másico de  $G = 300 \text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}$  muestra que el incremento es de 1,5 veces en comparación con tubos lisos. Khanpara et al. [13] demostraron que los coeficientes de película para el R-113 en los tubos con microaletas se incrementan del 30-100% en comparación con tubos lisos, aunque las caídas de presión aumentan un 80%. Sohlagger et al. [14], Eckels et al. [15], Kim y Shin [16], Chiang [17], Wang et al. [18] y Greco [19] pudieron mostrar que los incrementos en tubos con microaletas tienen incrementos en el intercambio de calor de 1.6 a 3.2 veces. Las causas de los incrementos en la transferencia de calor son las siguientes:

- Se incrementa el área de transferencia de calor.
- La baja tasa de flujo, el área de levantamiento en la dirección de la circunferencia es grande.
- Tiene más cavidades para la nucleación.
- Las aletas tienen un efecto en la turbulencia y en el flujo secundario.



**Figura 7.** Perfil de la aleta del tubo con microaletas [20].



**Figura 8.** Geometría del tubo de las microaletas [21].

La Figura 7 muestra la fotografía del perfil de la aleta de un tubo con microaletas. La Figura 8 muestra las características de geometría, diámetro interno, número de aletas, ángulo de hélix, altura, espesor, forma de la sección transversal y áreas de radio interno. Muchas formas y dimensiones se han experimentado en esta fecha. Las eficiencias de las aletas normalmente son alrededor del 100% y su altura típica es entre 0,2 y 0,3 mm.

### 2.2.3 Dispositivos de evacuación de remolinos

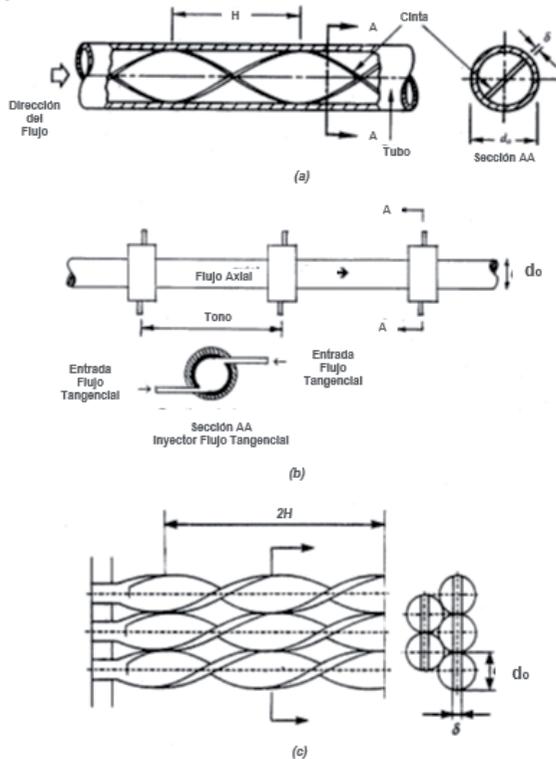
En la Figura 9 se muestran diferentes tecnologías para la intensificación en ebullición, todas ellas tendiendo a generar flujo secundario, turbulencia y retardar el CHF. Las técnicas de la generación del flujo turbulento mostradas son a) inserciones de tubo TT, b) inyector

de flujo tangencial y c) arreglo de cinta torcida. Ahora, estos tipos de aplicación también son útiles en intensificación de transferencia de calor en flujo monofásico. Mas dada su simplicidad y costo, los dispositivos más utilizados son las cintas torcidas, las que trataremos en detalle en este capítulo.

Aunque existen muchas maneras de crear flujos turbulentos en los tubos, la tecnología más práctica y ampliamente utilizada es la cinta retorcida. No obstante, esta tecnología es ampliamente empleada en flujos monofásicos, por lo que este trabajo se concentra en su estado actual en las aplicaciones de ebullición con agua. Algunas aplicaciones comerciales se muestran en detalle en la Figura 11.

La Figura 10 muestra los efectos de intensificación de transferencia de calor con el uso de la cinta retorcida. El sistema mostrado está diseñado para la producción de vapor sobrecalentado. El calentamiento es uniforme, mientras que el flujo másico, el nivel de presión y la temperatura de entrada se comportan de manera fija. La región 1 tiene flujo monofásico; puede verse cómo el coeficiente de película aumenta con lo que la temperatura de la pared disminuye.

Puede verse también en la Figura 10 que la ebullición subenfriada ocupa una pequeña área del tubo (2) seguida de la mayor ebullición (3) y la ebullición de película (4). El líquido es finalmente evaporado, y el vapor es sobrecalentado. Las reducciones de temperatura ocurren en todas las regiones de evaporación. En



**Figura 9.** Técnicas generadoras de remolinos: (a) Insertos de tubo TT, (b) Inyector flujo tangencial, (c) Arreglo de cinta torcida [22]

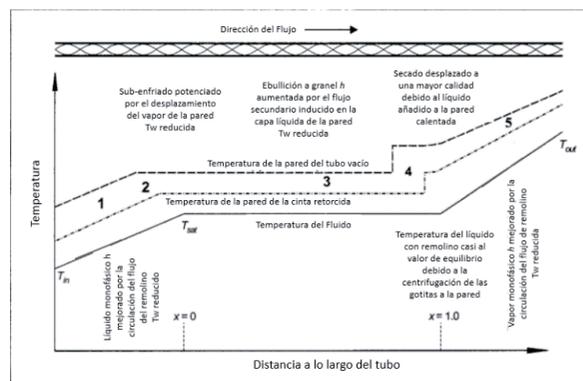
la mayor evaporación los tubos se secan con una calidad intermedia y la temperatura de la pared aumenta bruscamente. (4) la temperatura de la pared disminuye antes de aumentar de nuevo como vapor sobrecalentado (5).

Con cintas retorcidas, en región de la evaporación (3), el líquido es centrifugado contra la pared y la película de líquido se conserva. Las zonas secas se retrasan hasta una calidad muy alta. Las gotas restantes se centrifugan contra la pared disminuyendo su temperatura. Las temperaturas de la pared en la región monofásica se reducen, debido a los efectos de mezcla y flujo secundario

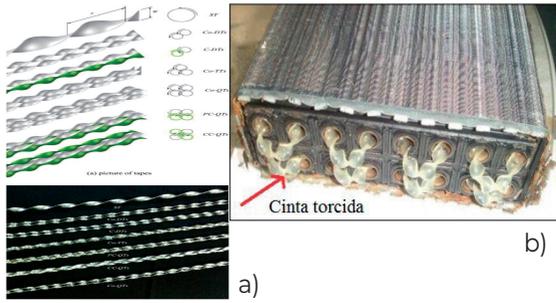
que se produce por la interacción con la cinta retorcida.

Las cintas torcidas son dispositivos muy simples y eficaces, son utilizados en el interior de los tubos y producen importantes efectos en la intensificación de transferencia de calor. También cuentan con una caída de presión importante [23]. Los efectos que causa la cinta torcida que incrementan el intercambio de calor son centrifugación del líquido contra la pared y el desplazamiento del vapor, reducción del diámetro hidráulico, aumento del tiempo de residencia, inducción de remolinos (flujo secundario).

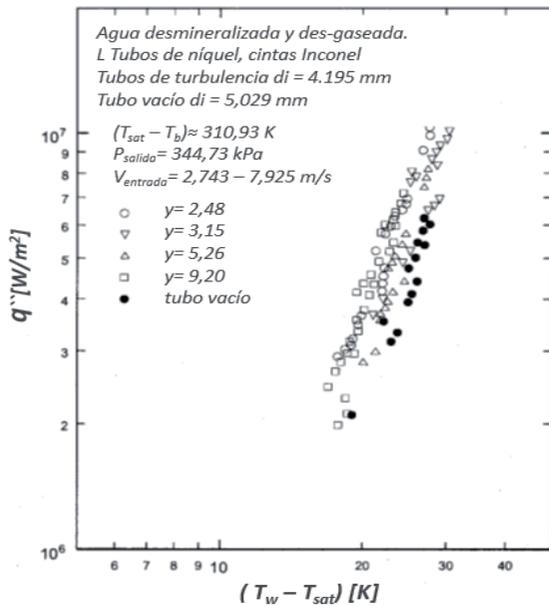
Las cintas torcidas son efectivas para incrementar el flujo de calor crítico en los tubos simples. La localización de la curva de ebullición con insertos de las cintas torcidas fue aclarada en un estudio realizado por [22], mostrada en la Figura 12, tras el cual concluyeron que las curvas de ebullición completamente desarrolladas son esencialmente lo mismo para varias cintas torcidas en flujo directo.



**Figura 10.** Influencia de la cinta torcida en la evolución de fluido y temperatura de la pared a la longitud del tubo en la ebullición convectiva [22].



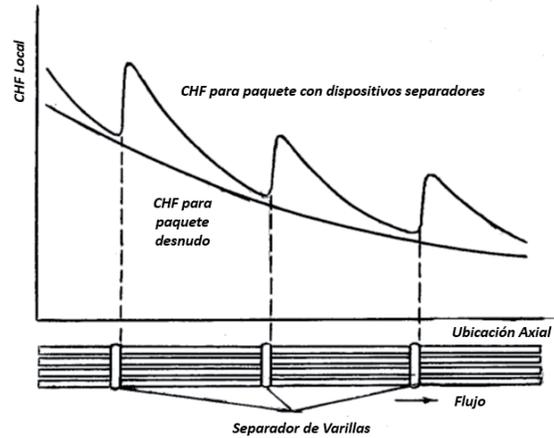
**Figura 11.** a) Ejemplos de cintas torcidas [24]. b) Aplicación en intercambiadores de calor [25].



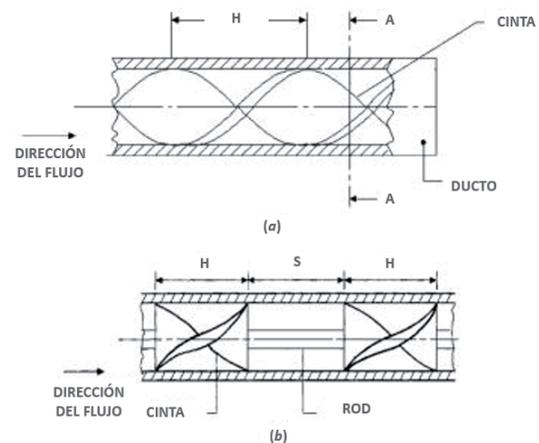
**Figura 12.** Dependencia de la ebullición totalmente desarrollada sobre la cinta torcida y perfiles de temperatura para película ebullición en tubo con cinta retorcida o sin ella [22].

### 2.2.4 Cintas torcidas interrumpidas

Se conocen estudios en las aplicaciones de la ebullición saturada, mas poco es conocido en su aplicación para ebullición subenfriada. Con esta aplicación combinada, los topes se colocan con las cintas (Figura 13). Los resultados fueron una



**Figura 13.** Efecto de vara espaciada en el CHF (Critical Heat Flux) [22].



**Figura 14.** Geometrías de cintas torcidas espaciadas y con variación de diámetro [26].

reducción importante de la presión y un efecto favorable en el CHF, obteniendo también incrementos importantes en el intercambio de calor.

Se realizaron otros estudios con el fin de minimizar las caídas de presión, el uso de diámetros inferiores en el diámetro interno del tubo y el uso de cintas interrumpidas (Figura 14). Los estudios múltiples se documentaron para cintas

interrumpidas en que diferentes posiciones y tramos fueron considerados, mas la literatura muestra generalmente por simplicidad la colocación de tramo solo en la entrada y salida de los ductos [22].

### 2.2.5 Tubos corrugados

La Figura 15 muestra tubos corrugados para aplicaciones comerciales. Un diagrama con dimensiones características se enseña en la Figura 16. La mayoría de los tubos corrugados tienen un arranque que es definido por las profundidades y el ángulo de hélix. El máximo diámetro interno se utiliza normalmente para definir la máxima transferencia de calor. El área de radio interna es ancha como 1, aunque no es muy común ser citado en la bibliografía. Los tubos corrugados se fabrican comúnmente en muchos metales tales como cobre, aleaciones de cobre, aceros al carbono, aleaciones del acero, etc. Las ondulaciones se definen por el paso de la ondulación, las profundidades de la ondulación y el número de las ondulations. Los Multi-Start son tubos corrugados con gran ondulación de profundidad, que son típicamente llamados *fluted tubes*. El uso de herramientas computacionales en el análisis

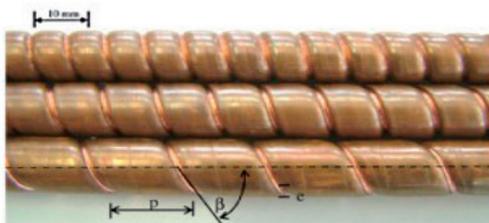


Figura 15. Tubos corrugados comerciales.

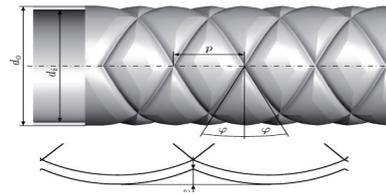


Figura 16. Geometría de un tubo corrugado [27].

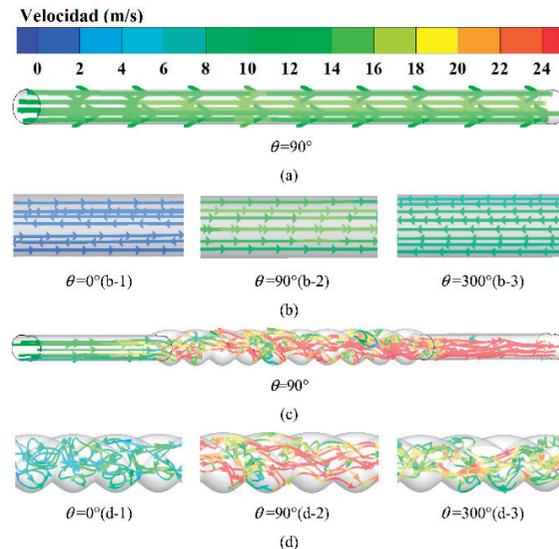
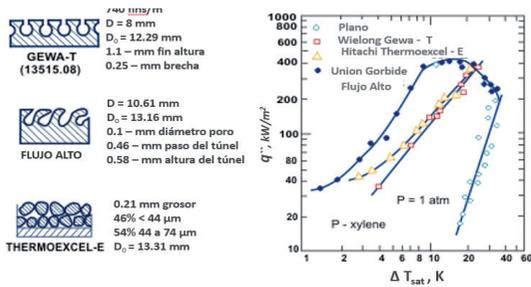


Figura 17. Análisis de CFD en tubos corrugados. [28].

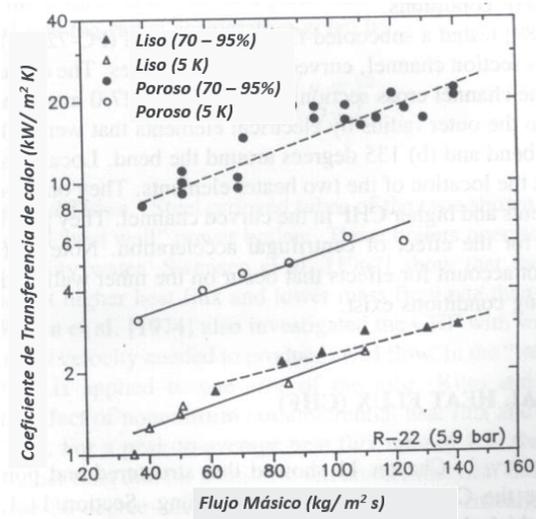
de los tubos corrugados es mostrado en la Figura 17.

### 2.2.6 Superficies recubiertas

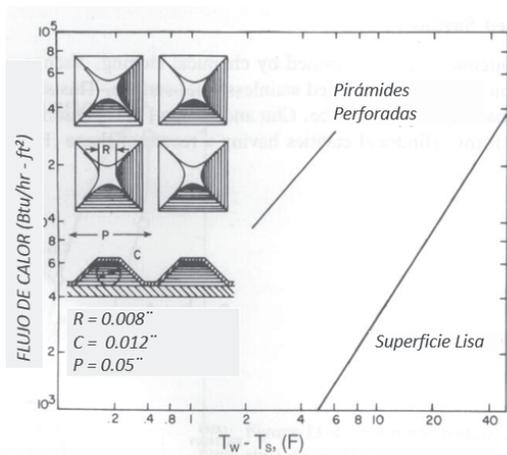
Generalmente son superficies porosas que se pueden aplicar en el interior de los tubos, que mejoran los efectos de la nucleación y, por consiguiente, los efectos de la convección, dado que afectan directamente las capas límites en que se presenta la mayor resistencia térmica de todo el sistema. Los efectos de la intensificación con este sistema se disminuyen cuando el flujo tiene alta calidad de vapor o se está cerca de la aparición del CHF, puesto que este efecto



**Figura 18.** Comparación del intercambio de calor entre superficies porosas y lisas [29].



**Figura 19.** Evaporación convectiva para tubos porosos y lisos [10].



**Figura 20.** Comparación de la evaporación entre una superficie insertada y una superficie lisa [10].

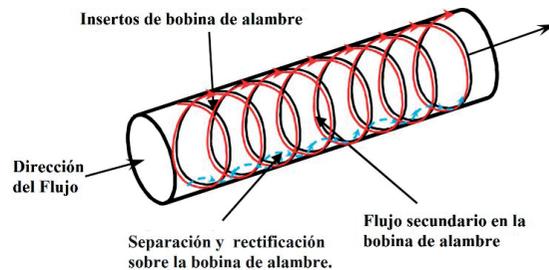
de la intensificación de calor se da en la película de líquido que se encuentra al lado de la pared (Figuras 18 y 19).

### 2.2.7 Inserciones de láminas perforadas

Se forman cavidades en las superficies; las densidades de estas pueden ser de 10-80/cm<sup>2</sup>. La Figura 20 muestra cómo el coeficiente de ebullición puede ser mejorado hasta 7.7 veces con referencia a una superficie lisa usando como fluido de trabajo el refrigerante R-11.

### 2.2.8 Tubos espiralados (coiled tubes)

Los insertos del alambre generalmente consisten en un resorte helicoidal que funciona como una rugosidad no integral. Una desventaja de las tecnologías con alambres es que no tienen un óptimo contacto térmico con las superficies de los tubos, además reducen el diámetro hidráulico y actúan como una superficie extendida. La fuerza centrífuga impuesta genera flujo secundario y mantiene el líquido sobre las paredes. Muchos estudios numéricos y experimentales, para la combinación de otras técnicas y el uso

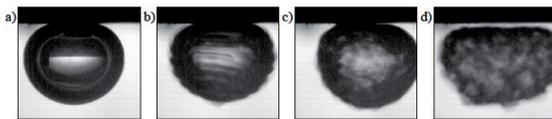


**Figura 21.** Tubo con insertos de bobinas de alambre [30].

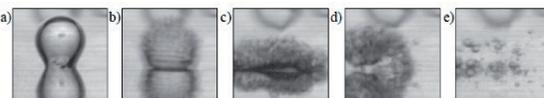
de materiales con memoria que ayudan a responder los requerimientos del sistema, extendiéndose y comprimiéndose, generan un mayor efecto sobre el flujo. La sección de un tubo con insertos de alambre en bobinas se muestra en la Figura 21.

### 2.2.9 Campos acústicos

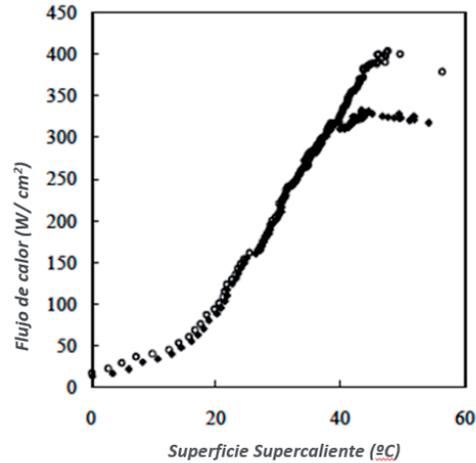
Muchos estudios se han hecho para usar un campo acústico en el incremento del flujo de calor crítico (CHF) [31-34]. Los diferentes experimentos realizados demuestran que el efecto de los campos acústicos en las burbujas, en la cercanía de la pared calentada, tiene importantes consecuencias en el intercambio de calor. Aunque en los últimos años los precios de los equipos electrónicos disminuyeron, la mayoría de los métodos están relacionados con un emisor sumergido, aparte que es una tecnología prometedora que tiene que cuantificar los potenciales de incremento de calor crítico CHF, que como se sabe puede producir daños graves al sistema. Cuando las burbujas de vapor



**Figura 22.** Serie de imágenes de video de alta velocidad que muestran el desprendimiento de una burbuja de aire [32].



**Figura 23.** Serie de imágenes de video de alta velocidad que muestran el desprendimiento de una burbuja de vapor [32].



**Figura 24.** Ausencia de Flujo de calor (♦) y presencia (o) de un campo acústico de 1 kHz

**Figura 24.** Flujo de calor en ausencia y en presencia de un campo acústico [32].

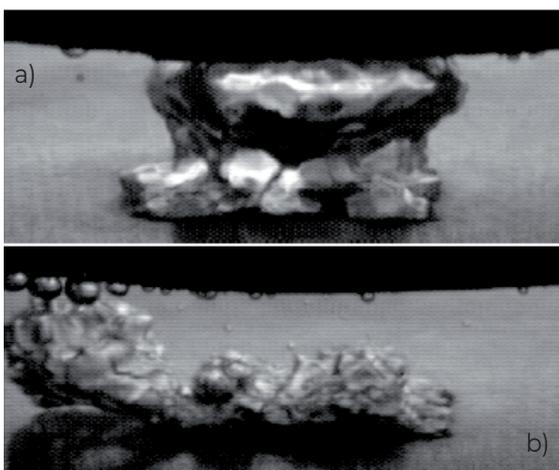
crecen a un determinado diámetro, el campo acústico los obliga a retirar de la superficie, lo cual genera incrementos importantes en el intercambio de calor. Estudios realizados por [24] muestran que para el agua puede incrementarse el límite de flujo crítico de calor de 107 W/cm<sup>2</sup> a 122 °C hasta 299 W/cm<sup>2</sup> a 136 °C. También mostrando que puede ser robusto para actuar con las horcas de flotación en el caso que esta se presenta.

Ejemplos de los efectos de los campos acústicos en el despegue de las burbujas de aire y vapor se muestran en las siguientes Figuras 22 y 23, así como los efectos sobre el flujo de calor crítico.

La efectividad de los campos acústicos inducidos en el incremento del flujo de calor crítico CHF retardan la transición de la película de ebullición y es efecto de estudio. Los estudios preliminares han demostrado un significativo incremento

Tabla 1. Comparación de CHF mejoradas natural y acústica a diferentes distancias de separación [32].

Distancia de separación (mm)	CHF (W/cm <sup>2</sup> ) sin campo acústico	CHF (W/cm <sup>2</sup> ) 1 kHz, 70.5 kPa campo acústico	Mejoramiento
∞	333 (40.1 °C)	N/A	N/A
10	333 (40.1 °C)	404 (49.7 °C)	21%
5	227 (38.4 °C)	368 (28.7 °C)	62%
3.5	165 (26.1 °C)	338 (32.4 °C)	147%



**Figura 25.** a) Ebullición natural antes del CHF. b) Ebullición en la presencia de un campo acústico en las mismas condiciones [32].

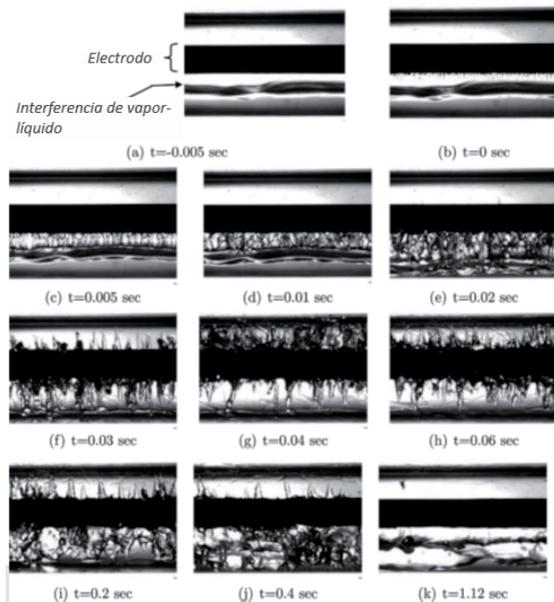
en el CHF. En la Figura 24, se muestra cómo el CHF pasa de 333 W/cm<sup>2</sup> hasta 404 W/cm<sup>2</sup>, teniendo un incremento cerca del 20%. Otro efecto y la inhibición de la formación de películas de vapor en la Figura 25 y mostrado en a) la formación de una película normal y en b) la formación de la película con un campo acústico puede verse como el patrón de formación de burbujas es afectado, retardando claramente la aparición de flujo de calor.

Finalmente, los resultados del experimento perpetrado por [32] se muestran

en la Tabla 1, pudiéndose ver las mejoras en la intensificación del intercambio de calor con los campos acústicos.

### 2.2.10 Campos eléctricos

Entre las diversas técnicas para mejorar la transferencia de calor, el uso de electro-hidrodinámica (DHE) es atractivo porque es una técnica relativamente no invasiva y proporciona un medio para el control activo de la transferencia de calor (Figura 25). El aumento de la DHE implica la aplicación de un campo eléctrico que interactúa con el medio líquido dieléctrico para inducir movimientos secundarios que desestabilizan la capa límite térmica cerca de la superficie de transferencia de calor a través de la creación de una turbulencia aumentada o más mezcla de flujo y más fases. Esto puede conducir a calentar los coeficientes de película, que pueden ser varias veces superiores a los obtenidos por técnicas convencionales de intensificación de intercambio de calor. La ganancia en rendimiento de la transferencia de calor es a menudo suficientemente grande para compensar cualquier caída de presión debido a la aplicación del DHE [35].



**Figura 26.** Respuesta transitoria de un flujo multifásico causado por un voltaje de paso aplicado de 8 kV [36].

El DHE puede ser aplicado relativamente de manera no intrusiva, usando diseños simples de los electrodos. Esta técnica es comparativamente robusta, ya que es mecánica y se puede configurar para un alto grado de control local [36].

### 2.2.11 Mecanismos combinados

Ocurre cuando dos o más de las técnicas tratadas con anterioridad se utilizan simultáneamente para obtener una intensificación del intercambio de calor adicional que si las técnicas se utilizaran individualmente. Estas técnicas a menudo implican proyectos complejos y usualmente tienen limitadas aplicaciones. Algunos mecanismos combinados son:

- Tubos corrugados con insertos de cintas torcidas.

- Tubos corrugados con vibraciones acústicas.
- Tubos secos internamente con insertos de cintas torcidas.
- Tubos con microaletas con un campo eléctrico.

## Conclusiones

Se presentó una revisión de las diferentes tecnologías activas y pasivas de intensificación de calor en ebullición convectiva. Aunque la mayoría de las tecnologías tienen muchos estudios, la problemática de la caída de presión con la incorporación de las tecnologías se debe mejorar. Se puede ver que algunas tecnologías se enfocan en la generación de flujo secundario, turbulencias y mantener películas de líquido para retardar la aparición del flujo de calor crítico, como ha sido el caso de cintas torcidas, tubos corrugados y tubos bobinados. Otros métodos se concentran en mejorar la nucleación como en el caso de las superficies porosas y campos acústicos. En el caso de los tubos de microaletas, que tienen un efecto sobre la convección y sobre la nucleación en las cavidades de los dientes, la combinación de las técnicas pasivas, por ejemplo, los tubos con microaletas, que tienen un efecto sobre la convección y sobre la nucleación, los procesos de fabricación podrían desarrollar mucho más las superficies para la nucleación, pudiendo efectuarse soluciones más baratas y complejas. Las aplicaciones complejas que incluyen vibraciones, ultrasonido, campos eléctricos, podrían resultar importantes en aplicaciones especiales, pero ahora

parece cerca su implementación a nivel comercial e industrial, aunque la reducción de costos en la tecnología electrónica podría hacer aplicaciones sostenibles a un futuro próximo. Mucho trabajo y desarrollo todavía está por hacer por los investigadores de las próximas generaciones, aún más con las necesidades del uso eficiente de energía y nuevas regulaciones de su uso para las próximas décadas, impulsada por los problemas relacionados con implicaciones ambientales, los recursos limitados y los efectos del cambio climático.

## Referencias

- [1] L. M. Chang, L. B. Wang, K. W. Song, D. L. Sun y J. F. Fan, "Numerical study of the relationship between heat transfer enhancement and absolute vorticity flux along main flow direction in a channel formed by a flat tube bank fin with vortex generators". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52, no. 7-8, pp. 1794-1801, mzo. 2009.
- [2] M. Sheikholeslami, M. Gorji-Bandpy y D. D., "Review of heat transfer enhancement methods: Focus on passive methods using swirl flow devices", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 49, pp. 444-469, sept. 2015.
- [3] T. Alam y M. H. Kim, "A comprehensive review on single phase heat transfer enhancement techniques in heat exchanger applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pp. 813-839, en. 2018.
- [4] Y. A. Cengel, *Transferencia de calor y masa*, 3.<sup>a</sup> ed. México: McGraw-Hill, 2007.
- [5] N. Zhang y Y. Choi, "A comparative study of dynamic changes in CO<sub>2</sub> emission performance of fossil fuel power plants in China and Korea", *Energy Policy*, vol. 62, pp. 324-332, nov. 2013.
- [6] H. Kanneganti, B. Gopalakrishnan, E. Crowe, O. Al-Shebeeb, T. Yelamanchi, A. Nimbarte, K. Currie y A. Abolhassani, "Specification of energy assessment methodologies to satisfy ISO 50001 energy management standard", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 23, pp. 121-135, oct. 2017.
- [7] A. E. Bergles, "Recent developments in enhanced heat transfer", *Heat and Mass Transfer*, vol. 47, no. 8, p. 1001, ago. 2011.
- [8] C. B., Chiou, D. C. Lu y C. H. Chiou, "A new correlation of forced convective boiling for pure and mixed refrigerants in horizontal smooth tube", *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, pp. 1864-1871, 2009.
- [9] J. H. Lienhard, *A heat transfer textbook*, 3.<sup>a</sup> ed. Cambridge. Phlogiston Press, 2008.
- [10] R. L. Webb, *Principles of enhanced heat transfer*. Nueva York: Wiley, 1997.
- [11] A. E. Bergles, "ExHFT for fourth generation heat transfer technology", *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 26, no. 2-4, pp. 335-344, jun. 2002.
- [12] S. Yoshida, T. Matsunaga, H. P. Hong y K. Nishikawa, "Heat transfer to

- refrigerants in horizontal evaporator tubes with internal, spiral grooves”, en *Proceedings of the 1987 ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference*, 1987.
- [13] J. C. Khanpara, A. E. Bergle y M. B. Pate, “Augmentation of R-113 in-tube evaporation with micro-fin tubes”, *ASHRAE Transactions*, vol. 92, no. 2B, pp. 506-524, jun. 1986.
- [14] L. M. Schlager, M. B. Pate y A. E. Bergles, “Evaporation and condensation heat transfer and pressure drop in horizontal, 12.7-mm microfin tubes with refrigerant 22”, *Journal of Heat Transfer*, vol. 112, no. 4, pp. 1041-1047, nov. 1990.
- [15] S. J. Eckels y M. B. Pate, “Evaporation and condensation of HFC-134a and CFC-12 in a smooth tube and a micro-fin tubes”, *ASHRAE Transactions*, vol. 97, no. 2, pp. 71-81, 1991.
- [16] M. H. Kim y J. S. Shin, “Evaporating heat transfer of R22 and R410A in horizontal smooth and microfin tubes”, *International Journal of Refrigeration*, vol. 28, no. 6, pp. 940-948, 2005.
- [17] Chiang, R., “Heat transfer and pressure drop during evaporation and condensation of refrigerant-22 in 7.5 mm diameter axial and helical grooved tubes”, *AIChE Symposium Series*, vol. 89, no. 295, pp. 205-210, 1993.
- [18] C. C. Wang, C. B. Chiou y D. C. Lu, “Single phase heat transfer and flow friction correlations for microfin tubes”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 17, no. 5, 500-508, 1996.
- [19] A. Greco, “Convective boiling of pure and mixed refrigerants: An experimental study of the major parameters affecting heat transfer”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 51, no. 3-4, pp. 896-909, febr. 2008.
- [20] A. Diani, S. Mancin y L. Rossetto, “R1234ze(E) flow boiling inside a 3.4 mm ID microfin tube”, *International Journal of Refrigeration*, vol. 47, pp. 105-119, nov. 2014.
- [21] E. P. Bandarra Filho, J. M. Sainz Jabardo y P. E. Barbieri, “Convective boiling pressure drop of refrigerant R-134a in horizontal smooth and microfin tubes”, *International Journal of Refrigeration*, vol. 27, no. 8, pp. 895-903, 2004.
- [22] A. E. Bergles y Y. A. Kuzma-Kichta, “Enhancement of heat transfer in swirled boiling flows”, *Heat Transfer Research*, vol. 40, no. 7, pp. 613-642, 2009.
- [23] F. P. Incropera y D. P. DeWitt, *Fundamentos de transferencia de calor*. México: Pearson Educación, 1999.
- [24] E. Smith y K. Kunlunan “Heat transfer enhancement by multiple twisted tape inserts and TiO<sub>2</sub>/water nanofluid”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 70, no. 1, pp. 896-924, sept. 2014.
- [25] A. Hasanpour, M. Farhadi y K. Sedighi, “A review study on twisted tape inserts on turbulent flow heat exchangers: The overall enhancement ratio criteria”, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 55, pp. 53-62, jul. 2014.
- [26] D. G. Kumbhar y N. K. Sane, “Heat transfer enhancement in a circular

- tube twisted with swirl generator: A review”, en *Proceedings of the 3rd International Conference on Advances in Civil, Structural and Mechanical Engineering*, National Institute of Technology, Gujarat, India, 2010.
- [27] A. Harleß, Franz E. y Breuer M., “Heat transfer and friction characteristics of fully developed gas flow in cross-corrugated tubes”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 107, pp. 1076-1084, abr. 2017.
- [28] F. Xin, Z. Liu, N. Zheng, P. Liu y W. Liu, “Numerical study on flow characteristics and heat transfer enhancement of oscillatory flow in a spirally corrugated tube”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 127, pp. 402-413, dic. 2018.
- [29] S. Yilmaz, J. J. Hwaleky, J. W. Westwater, “Pool boiling heat transfer performance for commercial enhanced tube surfaces”, en *Presented at 19th National Heat Transfer Conference*, American Society of Mechanical Engineers, Orlando, 1980.
- [30] B. Kumar, G. P. Srivastava, M. Kumar y A. K. Patil, “A review of heat transfer and fluid flow mechanism in heat exchange tube with inserts”, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 123, pp. 126-137, en. 2018.
- [31] N. P. Dhanalakshmi, R. Nagarajan, N. Sivagaminathan y Prasad, B. V. S. S. S., “Acoustic enhancement of heat transfer in furnace tubes”, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 59, pp. 36-42, sep. 2012.
- [32] Z. Douglas, T. R. Boziuk, M. K. Smith y A. Glezer, “Acoustically enhanced boiling heat transfer”, *Physics of Fluids*, vol. 24, no. 5, 052105, 2012.
- [33] S. W. Chen, F. C. Liu, H. J. Lin, P. S. Ruan, Y. T. Su, Y. C. Weng, J.-R. Wangac, J.-D. Leed y W. K. Lin, “Experimental test and empirical correlation development for heat transfer enhancement under ultrasonic vibration”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 143, pp. 639-649, oct. 2018.
- [34] N. Zhang y Y. Du, “Ultrasonic enhancement on heat transfer of palmitic-stearic acid as PCM in unit by experimental study”, *Sustainable Cities and Society*, vol. 43, pp. 532-537, nov. 2018.
- [35] H. Sadek, A. J. Robinson, J. S. Cotton, C. Y. Ching y M. Shoukri, “Electrohydrodynamic enhancement of in-tube convective condensation heat transfer”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 49, no. 9-10, pp. 1647-1657, 2006.
- [36] H. Sadek, C. Y. Ching y J. Cotton, “The effect of pulsed electric fields on horizontal tube side convective condensation”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, no. 19-20, pp. 3721-3732, sept. 2010.