

Estudio comparativo del uso de diferentes agentes de sacrificio para la producción de hidrógeno mediante fotocatalisis heterogénea utilizando el mineral arena negra como semiconductor

Comparative study of the use of different agents of sacrifice for the production of hydrogen by heterogeneous photocatalysis using the mineral black sand as a semiconductor

Andrés Felipe López Vásquez¹, Jorge Eduardo Cabezas Silva²

¹Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia, aflopezv@unal.edu.co

²Universidad libre, Bogotá, Colombia, jorgee.cabezass@gmail.com

Fecha de recepción: 05/21/2018 Fecha de aceptación: 06/20/2018



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.1.1372>

Como citar: López Vásquez, A. F. & Cabezas Silva, J. E. (2018). Estudio comparativo del uso de diferentes agentes de sacrificio para la producción de hidrógeno mediante fotocatalisis heterogénea utilizando el mineral arena negra como semiconductor. *AVANCES: INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA*, 15 (1), 77-85. DOI: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.1372>

Resumen

El mineral arena negra es una mezcla de óxidos de hierro (FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4), TiO_2 y SiO_2 dispuestos en una estructura natural, que podría ser utilizado como semiconductor. En este trabajo se evaluó el efecto del agente de sacrificio para la generación fotocatalítica de hidrógeno utilizando este material como catalizador. Para tal fin se evaluó el efecto de variables del proceso tales como tipo de agente de sacrificio (EDTA , Na_2SO_3 y metanol) normalmente utilizados como donadores de electrones en la reacción fotocatalítica de producción de hidrógeno, pH inicial de la suspensión (3.0, 7.0 y 9.0) y la concentración del sustrato. Estas variaron entre 1.0, 25.0 y 50.0 mM (EDTA , Na_2SO_3) y 10.0, 30.0 y 50.0% (v/v) para metanol. Bajo las condiciones de reacción evaluadas, los niveles de máxima producción de hidrógeno fueron $\text{Na}_2\text{SO}_3 > \text{EDTA} > \text{CH}_3\text{OH}$, respectivamente, y la máxima producción de hidrógeno se obtuvo con 25.0 mM Na_2SO_3 en medio ácido (pH 7.0). La degradación de EDTA y simultánea producción de hidrógeno mediante reacción fotocatalítica se vieron favorecidos a pH 3.0 y una concentración 1.0 mM.

Palabras clave: arena negra, producción fotocatalítica de hidrógeno, agente de sacrificio.

Abstract

Black sand mineral is a mixture of iron oxides (FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4), TiO_2 and SiO_2 presents in a natural structure, which could be used as a semiconductor. In this work, we evaluated the effect of the sacrificial agent for the photocatalytic hydrogen production using this material as a catalyst. For this purpose, the effect of process variables such as type of sacrificial agent (EDTA, Na_2SO_3 and CH_3OH), normally used as electron donors in the photocatalytic reaction of hydrogen production, initial pH of the suspension (3.0, 7.0 and 9.0) and the concentration of the substrate, were tested. These varied between 1.0, 25.0 and 50.0 mM for EDTA and Na_2SO_3 , and 10.0, 30.0 and 50.0% (v/v) for methanol. Under the reaction conditions evaluated, the maximum hydrogen production levels were $\text{Na}_2\text{SO}_3 > \text{EDTA} > \text{CH}_3\text{OH}$, respectively, and the maximum hydrogen production was obtained with 25 mM Na_2SO_3 in acid medium (pH 7.0). The degradation of EDTA and simultaneous production of hydrogen by photocatalytic reaction, were favored at pH 3.0 and a concentration 1.0 mM.

Keywords: black sand, photocatalytic hydrogen production, sacrificial agent.

1. Introducción

Debido a la demanda energética mundial, la industria se ha visto obligada a incrementar la producción de crudo, carbón o gas natural o, como en los últimos tiempos, a explorar otras fuentes energéticas que contribuyan a suplir esta demanda. Una de estas opciones ha sido la utilización de energías alternativas, las cuales han mostrado ventajas desde el punto de vista ambiental y económico debido a la reducción de emisiones gaseosas contaminantes (CO_2) y a la posibilidad de emplear recursos renovables para su obtención [1, 2, 3]. Entre estas, la producción de hidrógeno es una alternativa energética debido a su elevado poder calorífico y combustión limpia [4]

Durante las últimas décadas ha crecido el interés por convertir la energía solar en energía química [5], por ejemplo, mediante procesos fotoquímicos que a través de reacciones fotocatalíticas son capaces de producir hidrógeno por efecto de la sensibilización de un semiconductor con luz, cuya función es la generación de radicales libres responsables de la oxidación/reducción [6]. La principal desventaja ha sido la baja actividad de los semiconductores activados bajo radiación visible para disociar el agua, y que los catalizadores sintetizados que han mostrado mejor desempeño son activados con longitudes de onda del espectro UV [2]. Además, los niveles de producción de hidrógeno mediante esta técnica aún no son atractivos para la industria.

Con el fin de incrementar la eficiencia del proceso fotocatalítico, se han utilizado agentes de sacrificio para evitar la recombinación del par electrón/hueco responsable de la generación de radicales que disocian la molécula de agua. Esta alternativa implica la degradación del agente de sacrificio debido a las reacciones de oxidación/reducción promovidas por los radicales [7], y algunos de estos, tales como EDTA y metanol, están presentes en aguas residuales domésticas e industriales [2, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 4].

Aunque tradicionalmente se ha utilizado el TiO_2 como semiconductor en procesos fotocatalíticos, minerales tales como ilmenita y esfarelita han sido utilizados como semiconductores para la degradación fotocatalítica de compuestos organoclorados [12], debido a que la disposición de diferentes compuestos en este tipo de agregados minerales los convierte en una especie de catalizadores dopados de manera natural que podrían ser utilizados en diferentes procesos de oxidación/reducción.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la utilización de diferentes agentes de sacrificio en la producción fotocatalítica de hidrógeno mediante la utilización del mineral arena negra como semiconductor natural. Para este propósito, se comparó la actividad del material con diferentes agentes de sacrificio (Na_2SO_3 , EDTA y CH_3OH), compuestos modelo que pueden encontrarse en aguas residuales domésticas e industriales y podrían cumplir la función de inhibidores de la actividad

del oxígeno disuelto en la solución, favoreciendo la reducción del agua para la generación fotocatalítica de hidrógeno [13].

2. Experimental

2.1 Materiales

Para la realización de las pruebas fotocatalíticas, se utilizó arena negra natural obtenida de bancos de arena de playa (Santa Marta, Colombia). El material fue lavado para retirarle impurezas y fue utilizado sin modificación alguna. En un trabajo previo, se caracterizó el material morfológica, estructural y ópticamente [14], y se consideró como potencial semiconductor debido a sus características. Los agentes de sacrificio empleados para la preparación de las soluciones fueron Na_2SO_3 (Merck), EDTA (Merck) y metanol 99.8% (Carlo Erba) y agua deionizada. El pH inicial de la solución se ajustó con HCL (0.1 M, Merck) y NaOH (0.05 M, Merck) grado analítico.

2.2 Ensayos fotocatalíticos

La reacción se llevó a cabo en un reactor fotoquímico (ACE Glass) compuesto por una fuente de radiación (lámpara de presión media de mercurio de 70 W que emite principalmente luz UV) localizada dentro de un vaso cilíndrico de cuarzo enchaquetado, acoplado a un vaso de vidrio Pyrex. Se dispersaron 0.125 g de fotocatalizador en 250 ml de solución [15]. Las soluciones utilizadas para la generación de hidrógeno fueron 1.0, 25.0 y 50 mM (EDTA y Na_2SO_3), mientras que

para metanol fueron del 10.0, 30.0 y 50% (v/v) [5, 15, 16, 17]. Con el fin de evaluar el efecto del pH inicial del medio, se realizaron experimentos a pH 3.0, 7.0 y 9.0, respectivamente. Una vez preparada la suspensión, fue transferida dentro del vaso de reacción de vidrio y deaireada mediante purga con nitrógeno gaseoso durante 30 min antes de la iluminación. Durante la irradiación (5.0 h), se mantuvo la suspensión bajo agitación constante a una temperatura en 25 ± 1.5 °C con ayuda de un baño termostataado. El producto gaseoso desprendido de la mezcla reaccionante fue retirado periódicamente (cada hora) y el contenido de hidrógeno fue analizado mediante un cromatógrafo gaseoso (Agilent-6800A) equipado con un detector de conductividad (TCD) y una columna empacada de acero con un tamiz molecular de 5A°. El gas portador fue nitrógeno gaseoso (99.99%) a una velocidad de flujo de 3.0 ml/min.

3. Resultados y discusión

3.1 Efecto del agente de sacrificio en la producción fotocatalítica de hidrógeno

Diferentes estrategias se han propuesto para evitar la recombinación por electrón/hueco y mejorar de esta manera la producción fotocatalítica de hidrógeno. Una de ellas es el empleo de agentes de sacrificio, los cuales promueven la aparición de H^+ y OH^- , donando electrones o inhibiendo la actividad de recombinación para que las especies oxidantes aporten con la disociación del agua, tal como se menciona en [17, 18].

La Figura 1 muestra la máxima producción de hidrógeno utilizando arena negra como semiconductor para los diferentes agentes de sacrificio. Cabe destacar que el medio en el que se obtuvo la máxima producción de hidrógeno fue diferente para cada uno de los agentes de sacrificio. Para el Na_2SO_3 , EDTA y CH_3OH , fueron neutro, alcalino y ácido, respectivamente. Esto significa que la atracción entre el sustrato y catalizador desempeña un papel importante durante la recombinación. Aunque se esperaba que por las características del mineral el mecanismo fotocatalítico se viera favorecido a pH ácido siguiendo un mecanismo de foto-fenton por la presencia de alto contenido de hierro en el mineral (Figura 2), la sinergia entre los diferentes óxidos y metales (trazas de Cl, Sr, etc.) presentes en el sistema catalítico pudieron condicionar

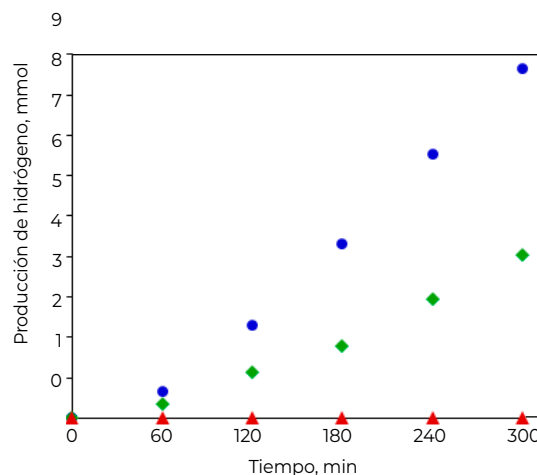


Figura 1. Efecto del tipo de agente de sacrificio sobre la producción fotocatalítica de hidrógeno. (•) 25 mM Na_2SO_3 , pH 7.0; (♦) 50 mM EDTA, pH 9.0 y (▲) 50% (v/v) CH_3OH , pH 3.0.

Fuente: Elaboración propia.

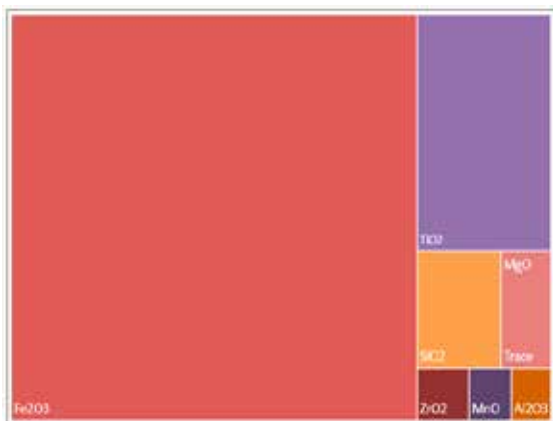


Figura 2. Distribución porcentual de los principales compuestos presentes en el mineral arena negra.

Fuente: Adaptado de [14]

la producción de hidrógeno. La máxima producción obtenida fue de 8.64, 4.17 y 0.023 mmol H₂, para Na₂SO₃, EDTA y CH₃OH, respectivamente.

3.2 Efecto del pH en la producción fotocatalítica de hidrógeno

La Figura 3 muestra la actividad catalítica del mineral con diferentes agentes de sacrificio (Na₂SO₃, EDTA y CH₃OH) a diferente pH inicial del medio (3.0, 7.0 y 9.0) para la generación fotocatalítica de hidrógeno.

La producción de hidrógeno a través de semiconductores heterogéneos depende de la afinidad de cargas entre el sustrato y la superficie del semiconductor. Este grado de atracción y/o repulsión depende del potencial de cero carga (pzc) del semiconductor. Sabiendo que para este mineral es de pH_{pzc} 2.7 [14], el sistema con valores de pH cercanos al

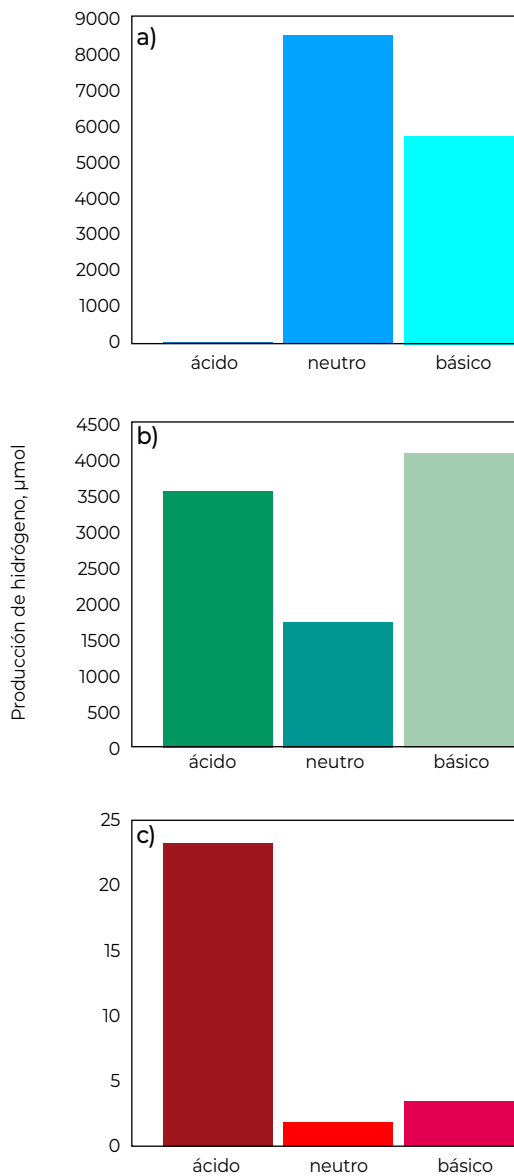


Figura 3. Efecto del pH sobre la producción fotocatalítica de hidrógeno a pH (3.0, 7.0 y 9.0). a) 25 mM Na₂SO₃, b) 50 mM EDTA, c) 50% v/v CH₃OH.

Fuente: Elaboración propia.

pH_{pzc} mantiene una polaridad positiva, promoviendo la movilidad de cargas donadas por el agente de sacrificio para generar radicales libres responsables de la disociación del agua.

Con base en lo anterior, la producción de hidrógeno con agentes de sacrificio en medio ácido se vio favorecida tanto para EDTA como para CH_3OH , respectivamente. Los niveles de máxima producción obtenidos fueron 3575.5, 23.5 y 13.4 $\mu\text{mol H}_2$, para EDTA, CH_3OH y Na_2SO_3 , respectivamente. En medio neutro, la producción de hidrógeno se vio favorecida fuertemente en soluciones de Na_2SO_3 , cuya producción fue de 8640.9 $\mu\text{mol H}_2$. Para EDTA y CH_3OH la producción fue de 1765.4 y 1.92 $\mu\text{mol H}_2$, respectivamente. Tanto para Na_2SO_3 como para EDTA la producción de hidrógeno se favorece en medio alcalino, mientras que no se favorece para CH_3OH (5743.7, 4117.6 y 3.44 $\mu\text{mol H}_2$). Na_2SO_3 , EDTA y CH_3OH , respectivamente.

Para el caso de EDTA como agente de sacrificio, la presencia de iones de sodio en la solución a medida que avanza la reacción puede disminuir la actividad fotocatalítica debido a la posible fisiorción del Na_2^+ sobre la superficie del mineral. Esto puede disminuir la carga negativa del mineral perjudicando la generación de radicales libres [19, 20]. Para el metanol, la baja actividad pudo presentarse por el tipo de adsorción sobre la superficie del mineral (molecular y/o disociativamente), dando lugar a la formación de nuevos grupos funcionales que no favorecen la generación de radicales responsables de la disociación del agua [21].

Otro aspecto importante es que debido a la heterogeneidad de la composición del mineral la actividad catalítica puede ser afectada por la participación

de varios óxidos y especies metálicas en el sistema catalítico. El resultado serán diferentes grados de mineralización del sustrato, con lo que se obtienen diferentes rendimientos en la producción de hidrógeno [15].

3.3 Producción de hidrógeno vs. degradación fotocatalítica de EDTA

Para evaluar el rendimiento de la generación fotocatalítica de hidrógeno mediada por EDTA como agente de sacrificio (compuesto modelo) utilizando arena negra como semiconductor, se valoraron diferentes concentraciones de sustrato en medio ácido (pH 3.0) y alcalino (pH 9.0). La Figura 4 muestra la relación entre la producción de hidrógeno y la degradación del contenido de carbono orgánico total.

En medio ácido (pH 3.0) y a alta concentración de sustrato (50 mM EDTA), la relación de producción de hidrógeno-degradación de sustrato es relativamente constante mientras que a bajas concentraciones la velocidad de producción de hidrógeno se incrementa todo el tiempo. De otra parte, en medio alcalino (pH 9.0), la velocidad de producción es menor a bajas concentraciones (1.0 mM) comparada con el medio ácido, sin embargo, los niveles de producción a altas concentraciones (50 mM) son del mismo orden de magnitud en ambos medios.

Con base en los resultados obtenidos, el mecanismo fotocatalítico que gobierna la producción de hidrógeno utilizando EDTA como agente de sacrificio es el

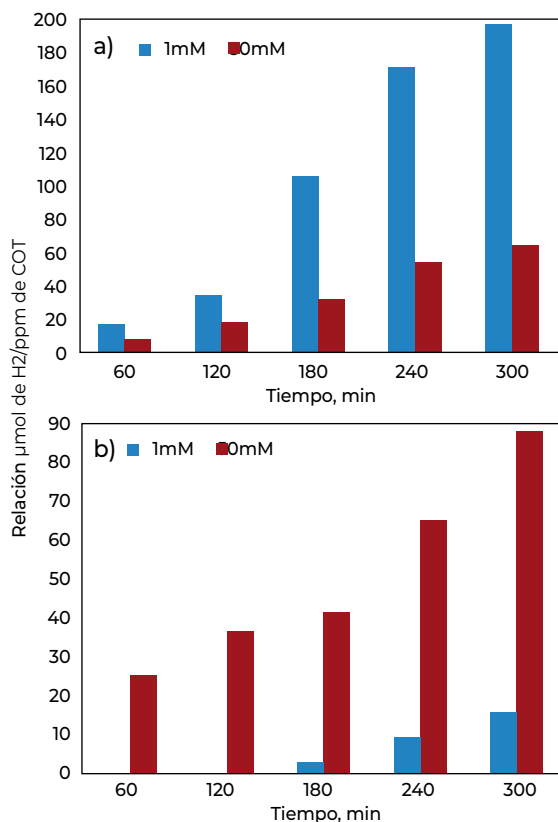


Figura 4. Relación producción de hidrógeno-degradación de carbono orgánico total durante el proceso fotocatalítico. (a) medio ácido (pH 3.0), (b) medio alcalino (pH 9.0).

Fuente: Elaboración propia.

de foto-fenton. Este resultado es coherente con los reportados en la literatura [14, 22]. En medio ácido, cuando se aumenta la concentración del sustrato, posiblemente la generación de radicales es insuficiente para utilizar las cargas disponibles del agente de sacrificio y por ende no se ve reflejado el incremento en la producción de hidrógeno; en otras palabras, la eficiencia del sistema fotocatalítico se ve limitada por la cantidad de radicales que el semiconductor pueda generar.

4. Conclusiones

Los mayores niveles de producción fotocatalítica de hidrógeno utilizando arena negra como semiconductor en su orden de magnitud fueron con los siguientes agentes de sacrificio $\text{Na}_2\text{SO}_3 > \text{EDTA} > \text{CH}_3\text{OH}$. La máxima producción de hidrógeno fue obtenida con Na_2SO_3 25 mM en medio neutro (pH 7.0).

Para el sistema fotocatalítico propuesto, la utilización de metanol como agente de sacrificio no se vio favorecida en ningún medio, en contraste con los resultados reportados en la literatura. Al parecer, no existe atracción entre este sustrato y la superficie del mineral por lo que la generación de radicales es limitada.

El mecanismo fotocatalítico que gobierna la producción de hidrógeno utilizando EDTA como agente de sacrificio es el de foto-fenton. Las velocidades de producción de hidrógeno dependen del pH inicial del medio y de la concentración del agente de sacrificio.

Referencias

- [1] Demirbas, A. (2008). *Biodiesel: A realistic fuel alternative for diesel engines*. Springer-Verlag, Londres.
- [2] Yang, Y. Z., Chang, C.-H. & Idriss, H. (2006). Photo-catalytic production of hydrogen from ethanol over M/TiO₂ catalysts (M= Pd, Pt or Rh). *Applied Catalysis B: Environmental*, 67 (3-4), 217-222. <http://doi.org/10.1016/j.apcatb.2006.05.007>.

- [3] Lv, W., Lv, X., Xiang, J., Zhang, Y., Li, S., Bai, C., Song, B. & Hanb, K. (2017). "A novel process to prepare high-titanium slag by carbothermic reduction of pre-oxidized ilmenite concentrate with the addition of Na_2SO_4 ". *International Journal of Mineral Processing*, 167, 68-78. <http://doi.org/10.1016/j.minpro.2017.08.004>.
- [4] Su, E. C., Huang, B. S, Liu, C. C. & Wey, M. Y. (2015). Photocatalytic conversion of simulated EDTA wastewater to hydrogen by pH-resistant Pt/TiO₂ – activated carbon photocatalysts. *Renewable Energy*, 75, 266-271. <http://doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.052>.
- [5] Silva, C. G., Sampaio, M. J., Marques, R. R, Ferreira, L. A., Tavares, P. B., Silva, A. M & Faria, J. L.(2015). Photocatalytic production of hydrogen from methanol and saccharides using carbon nanotube-TiO₂ catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental*, 178, 82 – 90. <http://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.10.032>.
- [6] Petala, A., Ioannidou, E., Georgaka, A., Bourikas, K. & Kondarides, D. I. (2015). Hysteresis phenomena and rate fluctuations under conditions of glycerol photo-reforming reaction over CuOx/TiO₂ catalysts. *Applied Catalysis B: Environmental*, 178, 201 – 209. <http://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.09.021>.
- [7] Ridha, F. N., Duchesne, M. A., Lu, X., Lu, D. Y., Filippou, D. & Hughes, R. W. (2016). Characterization of an ilmenite ore for pressurized chemical looping combustion. *Applied Energy*, 63, 323 – 333. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.070>.
- [8] Sharma, M. P., Akyurtlu, J. F. & Akyurtlu, A. (2015). Autothermal reforming of isobutanol over promoted nickel xerogel catalysts for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40 (39), 13368 – 13378, oct.. <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.07.113>.
- [9] Bang, Y., Park, S., Ju, S., Jaekyeong, H., Ji, Y., Song, H., Ho, J., Ki, C., Kang, H. & Song, I. K. (2016). Hydrogen production by steam reforming of liquefied natural gas (LNG) over mesoporous Ni/Al₂O₃ catalyst prepared by an EDTA-assisted impregnation method. *Applied Catalysis B: Environmental*, 180, 179 – 188. <http://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.06.023>.
- [10] Gaya, U. I. & Abdullah, A. H. (2008). Heterogeneous photocatalytic degradation of organic contaminants over titanium dioxide: A review of fundamentals, progress and problems. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 9 (1), 1–12. <http://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2007.12.003>.
- [11] Ismagilov, I. Z., Matus, E. V., Kuznetsov, V. V., Mota, N., Navarro, R. M., Yashnik, S. A., Prosvirina, I. P., Kerzhentseva, M. A., Ismagilovac, Z. R. & Fierro, J. L. G. (2014). Hydrogen production by autothermal reforming of methane: Effect of promoters (Pt, Pd, Re, Mo, Sn) on the performance of Ni/

- La₂O₃ catalysts. *Applied Catalysis A: General*, 481, 104–115. <http://doi.org/10.1016/j.apcata.2014.04.042>.
- [12] Schoonen, M. A., Xu, Y. & Strongin, D. R. (1998). An introduction to geocatalysis. *Journal of Geochemical Exploration*, 62 (1-3), 201–215. [http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0375-6742\(97\)00069-1](http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0375-6742(97)00069-1).
- [13] Shenoy, V. R. & Joshi, J. B. (1992). Kinetics of oxidation of aqueous sulphite solution by nitric oxide. *Water Research*, 26 (7), 997–1003.
- [14] Reyes Gómez, G. A. (2015). *Producción fotocatalítica de hidrógeno basada en el mineral arena negra como semicon-ductor*. Universidad Libre, Bogotá, Colombia.
- [15] Udani, P. P. C. & Rønning, M. (2015). Comparative study on the photocatalytic hydrogen production from methanol over Cu-, Pd-, Co- and Au-loaded TiO₂. *Oil & Gas Science and Technology*, 70 (5), 831–839. <http://doi.org/10.2516/ogst/2015025>.
- [16] Boudjemaa, A., Rebahi, A., Terfassa, B., Chebout, R., Mokrani, T., Bachari, K. & Coville, N. J. (2015). Fe₂O₃/carbon spheres for efficient photocatalytic hydrogen production from water and under visible light irradiation. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 140, 405–411. <http://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.04.036>.
- [17] Madhumitha, A., Preethi, V., & Kanmani, S. (2018). Photocatalytic hydrogen production using TiO₂ coated iron-oxide core shell particles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43 (8), 3946–3956. <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.12.127>.
- [18] Ni, M., Leung, M. K., Leung, D. Y. & Sumathy, K. (2007). A review and recent developments in photocatalytic water-splitting using TiO₂ for hydrogen production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11 (3), 401–425. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2005.01.009>.
- [19] Chen, P., Zhai, J., Sun, W., Hu, Y., Yin, Z. & Lai, X. (2017). Adsorption mechanism of lead ions at ilmenite/water interface and its influence on ilmenite flotability. *Journal of Industrial And Engineering Chemistry*, 53, 285–293. <http://doi.org/10.1016/j.jiec.2017.04.037>.
- [20] Rahimi, S., Irannajad, M. & Mehdilo, A. (2017). Effects of sodium carbonate and calcium chloride on calcite depression in cationic flotation of pyrolusite. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27 (8), 1831–1840. [http://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60206-1](http://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60206-1).
- [21] Chiarello, G. L., Ferri, D. & Selli, E. (2018). In situ attenuated total reflection infrared spectroscopy study of the photocatalytic steam reforming of methanol on Pt/TiO₂. *Applied Surface Science*, 450, 146–154. <http://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.04.167>.
- [22] Chong, M. N., Jin, B., Chow, C. W. & Saint, C. (2010). Recent developments in photocatalytic water treatment technology: A review. *Water Research*, 44 (10), 2997–3027. <http://doi.org/10.1016/j.watres.2010.02.039>

Intensificación de la transferencia de calor en ebullición convectiva

Intensification of heat transfer in convective boiling

José Luis Ramírez Duque¹

¹Pontificia Universidad Javeriana, Cali, Colombia, 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.

1. 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

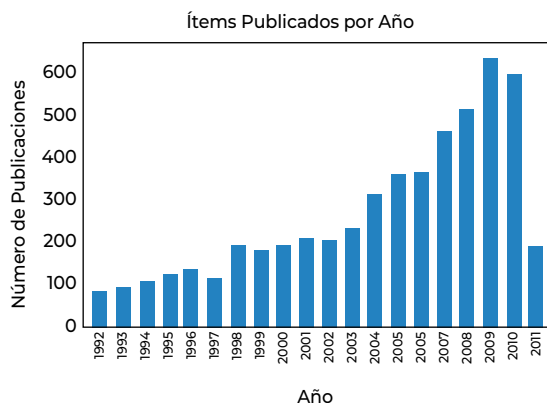


Figura 1. Incremento de la literatura científica en la transferencia de calor [7].

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.

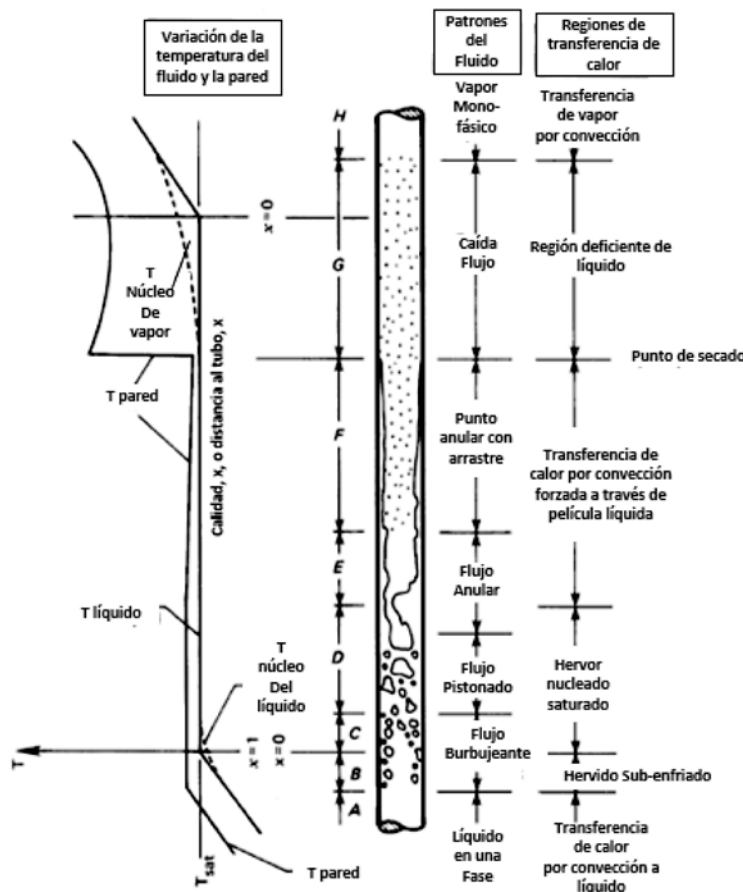


Figura 2. Desarrollo del flujo bifásico en el tubo vertical con flujo de calor constante [9].

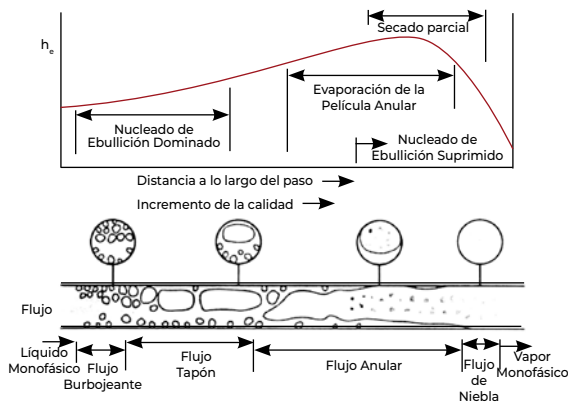


Figura 3. Desarrollo del flujo bifásico en un tubo horizontal con flujo de calor constante [10].

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

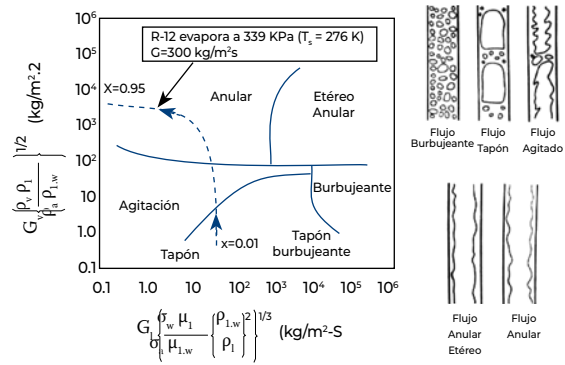


Figura 4. Patrones de ebullición del refrigerante R-12 en un tubo vertical [10].

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 frigorífico: (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 $G = 300 \text{ kg-m}^2/\text{s}$ 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].

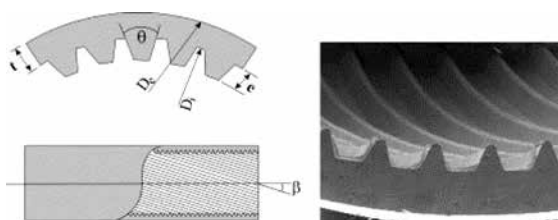


Figura 8. Geometría del tubo de las microaletas [21].

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

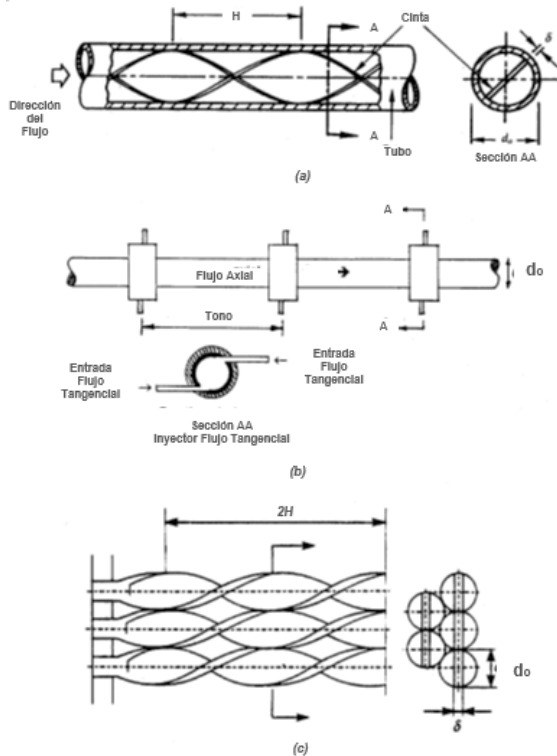


Figura 9. Técnicas generadoras de remolinos: (a) Insertos de tubo TT, (b) Inyector flujo tangencial, (c) Arreglo de cinta torcida [22]

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.

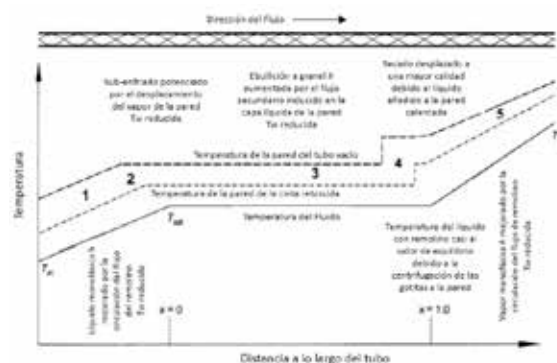


Figura 10. Influencia de la cinta torcida en la evolución de fluido y temperatura de la pared a la longitud del tubo en la ebullición convectiva [22].

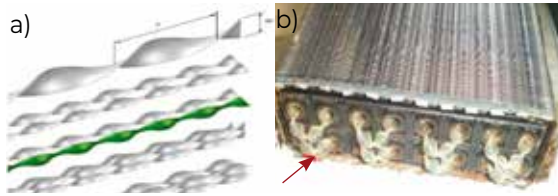


Figura 11. a) Ejemplos de cintas torcidas [24]. b) Aplicación en intercambiadores de calor [25].

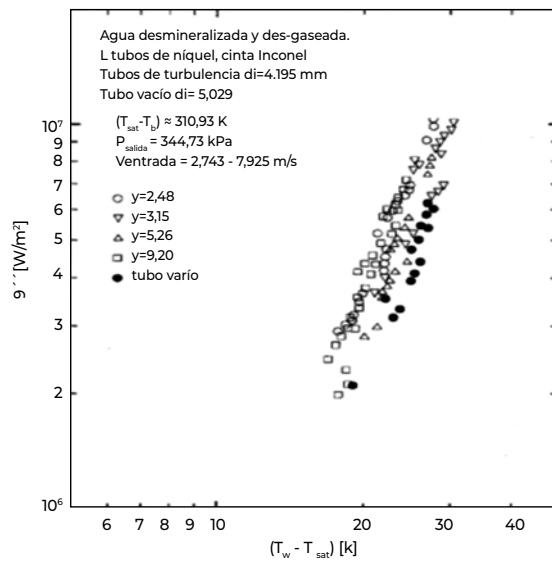


Figura 12. Dependencia de la ebullición totalmente desarrollada sobre la cinta torcida y perfiles de temperatura para película ebullición en tubo con cinta retorcida o sin ella [22].

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

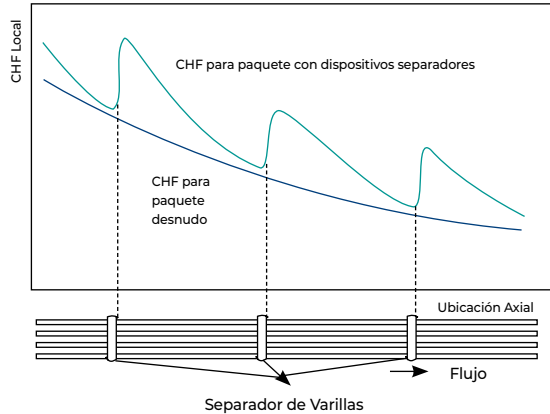


Figura 13. Efecto de vara espaciada en el CHF (Critical Heat Flux) [22].

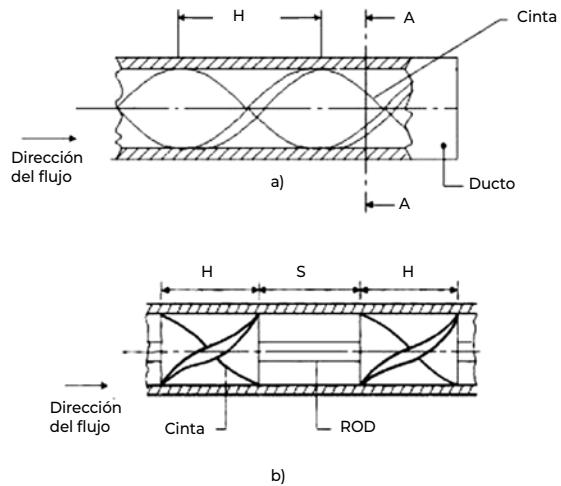


Figura 14. Geometrías de cintas torcidas espaciadas y con variación de diámetro [26].

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 ondulaciones. Los Multi-Start son tubos corrugados con gran ondulación

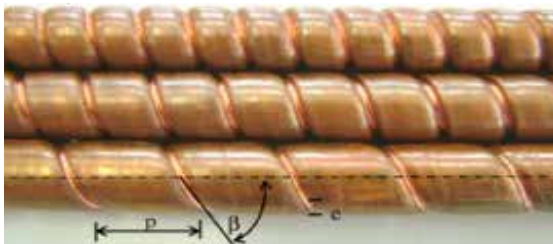


Figura 15. Tubos corrugados comerciales.

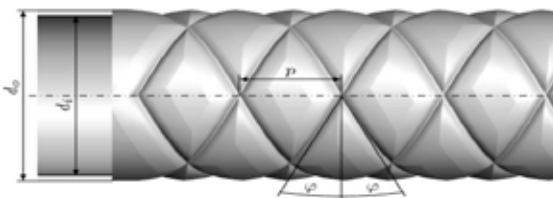


Figura 16. Geometría de un tubo corrugado [27].

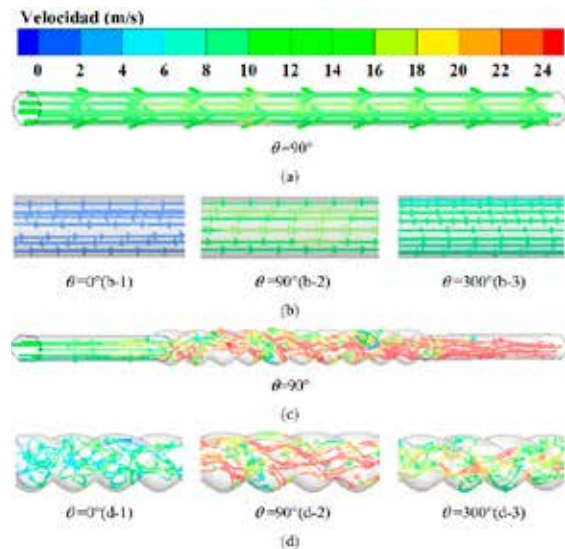


Figura 17. Análisis de CFD en tubos corrugados. [28].

de profundidad, que son típicamente llamados *fluted tubes*. El uso de herramientas computacionales en el análisis 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 de la intensificación de calor se da en la película de líquido que se encuentra al lado de la pared (Figuras 18 y 19).

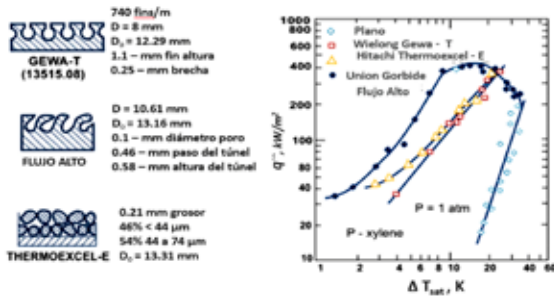


Figura 18. Comparación del intercambio de calor entre superficies porosas y lisas [29].

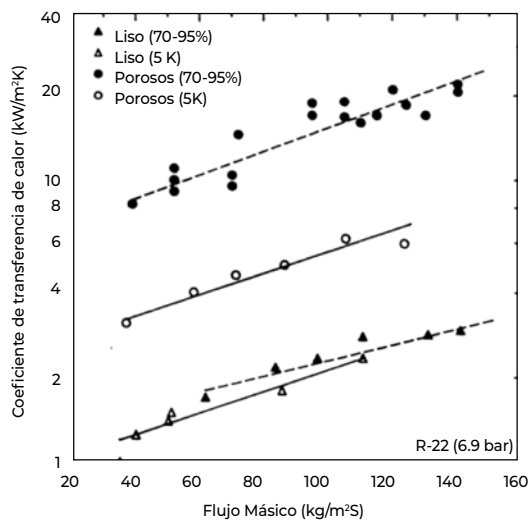


Figura 19. Evaporación convectiva para tubos porosos y lisos [10].

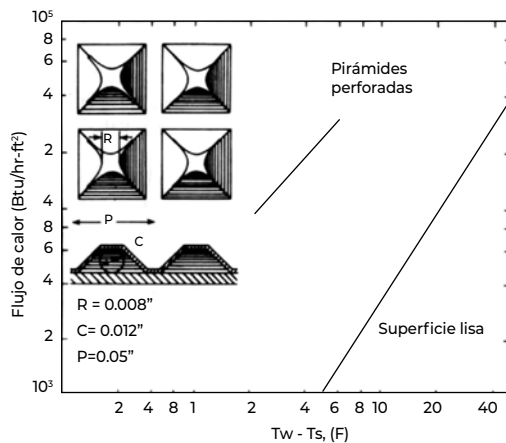


Figura 20. Comparación de la evaporación entre una superficie insertada y una superficie lisa [10].

2.2.7 Inserciones de láminas perforadas

Se forman cavidades en las superficies; las densidades de estas pueden ser de 10-80/cm². 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 de materiales con memoria que ayudan a responder los requerimientos del sistema, extendiéndose y comprimiéndose, generan un mayor efecto sobre el

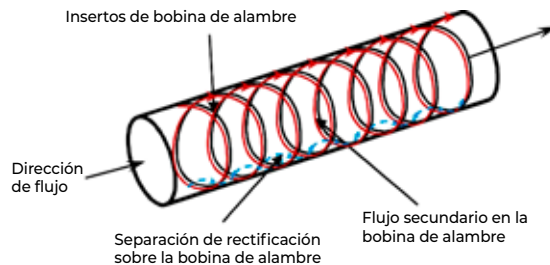


Figura 21. Tubo con insertos de bobinas de alambre [30].

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 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.

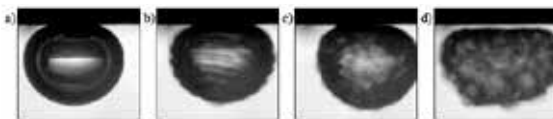


Figura 22. Serie de imágenes de video de alta velocidad que muestran el desprendimiento de una burbuja de aire [32].

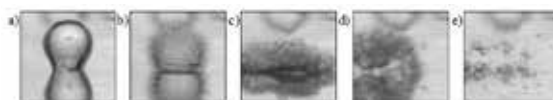
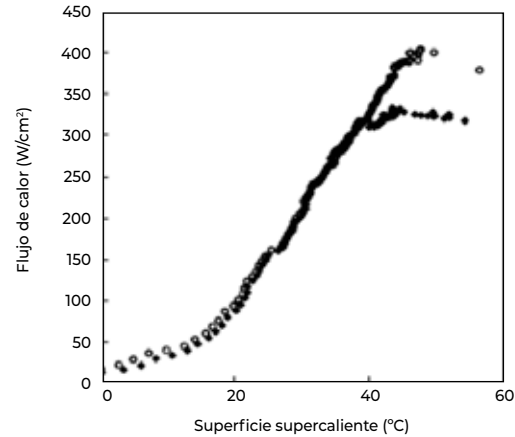


Figura 23. Serie de imágenes de video de alta velocidad que muestran el desprendimiento de una burbuja de vapor [32].



Ausencia de flujo de calor (●) y presencia (○) de un campo acústico de 1 kHz

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

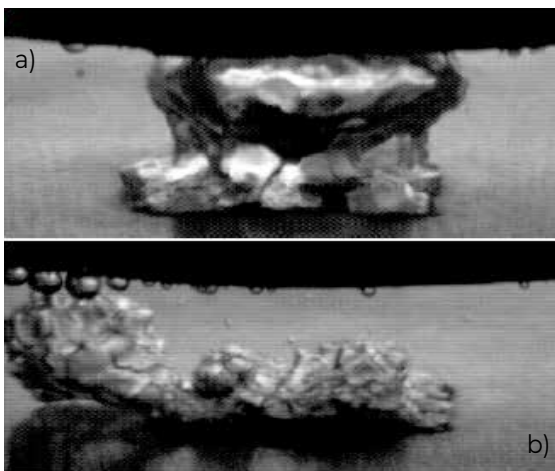
Estudios realizados por [24] muestran que para el agua puede incrementarse el límite de flujo crítico de calor de 107 W/cm² a 122 °C hasta 299 W/cm² a 136 °C. También mostrando que puede ser robusto para actuar con las horcas de flotación en el caso que esta se presenta.

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 en el CHF. En la Figura 24, se muestra cómo el CHF pasa de 333 W/cm² hasta 404 W/cm², teniendo un incremento cerca del 20%. Otro efecto y

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

Distancia de separación (mm)	CHF (W/cm ²) sin campo acústico	CHF (W/cm ²) 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].

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].

El DHE puede ser aplicado relativamente de manera no intrusiva, usando diseños simples de los electrodos. Esta técnica

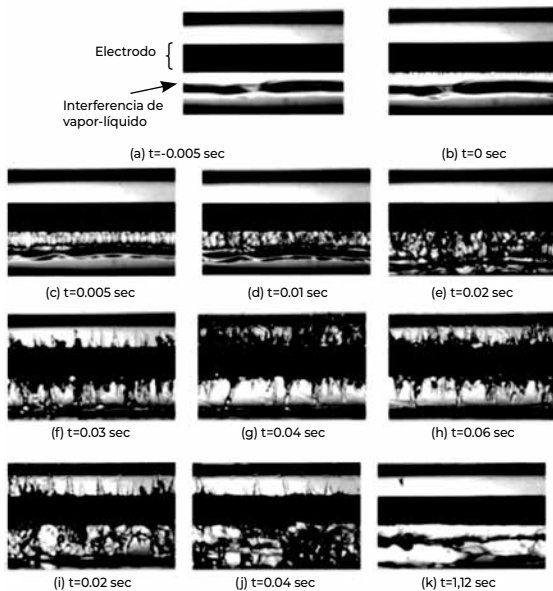


Figura 26. Respuesta transitoria de un flujo multifásico causado por un voltaje de paso aplicado de 8 kV [36].

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.

3. 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] Chang, L. M., Wang, L. B., Song, K. W., Sun, D. L. & Fan, J. F. (2009). 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*, 52 (7-8), 1794-1801.
- [2] Sheikholeslami, M., Gorji-Bandpy, M., & Ganji, D. D. (2015). Review of heat transfer enhancement methods: Focus on passive methods using swirl flow devices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 444-469.
- [3] Alam, T. & Kim, M. H. (2018). A comprehensive review on single phase heat transfer enhancement techniques in heat exchanger applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 813-839.
- [4] Cengel, Y. A. (2007). *Transferencia de calor y masa*, 3.^a ed. McGraw-Hill, México.
- [5] Zhang, N. & Choo, Y. (2013). A comparative study of dynamic changes in CO₂ emission performance of fossil fuel power plants in China and Korea. *Energy Policy*, 62, 324-332.
- [6] Kanneganti, H., Gopalakrishnan, B., Crowe, E., Al-Shebeeb, O., Yelamanchi, T., Nimbarte, A., Currie, K., & Abolhassani, A. (2017). Specification of energy assessment methodologies to satisfy ISO 50001 energy management standard. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 23, 121-135.
- [7] Bergles, A. E. (2011). Recent developments in enhanced heat transfer. *Heat and Mass Transfer*, 47 (8), 1001.
- [8] Chiou, C. B., Lu, D. C. & Chiou, C. H. (2009). A new correlation of forced convective boiling for pure and mixed refrigerants in horizontal smooth tube. *Applied Thermal Engineering*, 29, 1864 -1871.
- [9] Lienhard, J. H. (2008). *A heat transfer text-book*, 3.^a ed. Phlogiston Press. Cambridge.
- [10] Webb, R. L. (1997). *Principles of enhanced heat transfer*. Wiley, Nueva York.
- [11] Bergles, A. E. (2002). ExHFT for fourth generation heat transfer technology. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 26 (2-4), 335-344.
- [12] Yoshida, S., Matsunaga, T., Hong, H. P. & Nishikawa, K. (1987). Heat

- transfer to refrigerants in horizontal evaporator tubes with internal, spiral grooves, en *Proceedings of the 1987 ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference*.
- [13] Khanpara, J. C., Bergle, A. E. & Pate, M. B. (1986). Ugmentation of R-113 in-tube evaporation with micro-fin tubes. *ASHRAE Transactions*, 92 (2B), 506 -524.
- [14] Schlager, L. M., Pate, M. B. & Bergles, A. E. (1990). Evaporation and condensation heat transfer and pressure drop in horizontal, 12.7-mm microfin tubes with refrigerant 22. *Journal of Heat Transfer*, 112 (4), 1041 -1047.
- [15] Eckels, S. J. & Pate, M. B. (1991). Evaporation and condensation of HFC-134a and CFC-12 in a smooth tube and a micro-fin tubes. *ASHRAE Transactions*, 97 (2), 71-81.
- [16] Kim, M. H. & Shin, J. S. (2005). Evaporating heat transfer of R22 and R410A in horizontal smooth and microfin tubes. *International Journal of Refrigeration*, 28 (6), 940-948.
- [17] Chiang, R. (1993). 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*, 89 (295), 205 - 210.
- [18] Wang, C. C., Chiou, C. B. & Lu, D. C. (1996). Single phase heat transfer and flow friction correlations for microfin tubes. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 17 (5), 500 -508.
- [19] Greco, A. (2008). Convective boiling opure and mixed refrigerants: An experimental study of the major parameters affecting heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51 (3-4), 896-909.
- [20] Diani, A., Mancin, S. & Rossetto, L. (2014). R1234ze(E) flow boiling inside a 3.4 mm ID microfin tube. *International Journal of Refrigeration*, 47 (105-119).
- [21] Bandarra Filho, E. P., Sainz Jabardo, J. M. & Barbieri, P. E. (2004). Convective boiling pressure drop of refrigerant R-134a in horizontal smooth and microfin tubes. *International Journal of Refrigeration*, 27 (8), 895-903.
- [22] Bergles, A. E. & Kuzma-Kichta, Y. A. (2009). Enhancement of heat transfer in swirled boiling flows. *Heat Transfer Research*, 40 (7), 613-642.
- [23] Incropera, F. P. & DeWitt, D. P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. Pearson Educación, México.
- [24] Smith, E. & Kunlanan, K. (2014). Heat transfer enhancement by multiple twisted tape inserts and TiO₂/water nano-fluid. *Applied Thermal Engineering*, 70 (1), 896-924.
- [25] Hasanpour, A., Farhadi, M. & Sedighi, K. (2014). A review study on twisted tape inserts on turbulent flow heat exchangers: The overall enhancement ratio criteria. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 55, 53-62.
- [26] Kumbhar, D. G. & Sane, N. K. (2010). 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*.
- [27] Harleß, A., Franz, E. & Breuer, M. (2017). Heat transfer and friction characteristics of fully developed gas flow in cross-corrugated tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 107, 1076-1084.
- [28] Xin, F., Liu, Z., Zheng, N., Liu, P. & Liu, W. (2018). Numerical study on flow characteristics and heat transfer enhancement of oscillatory flow in a spirally corrugated tube. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127, 402-413.
- [29] Yilmaz, S., Hwalek, J. J. & Westwater, J. W. (1980). *Pool boiling heat transfer performance for commercial enhanced tube surfaces*, en *Presented at 19th National Heat Transfer Conference, American Society of Mechanical Engineers, Orlando*.
- [30] Kumar, B., Srivastava, G. P., Kumar, M. & Patil, A. K. (2018). A review of heat transfer and fluid flow mechanism in heat exchange tube with inserts. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 123, 126-137.
- [31] Dhanalakshmi, N. P., Nagarajan, R., Sivagaminathan, N. & Prasad, B. V. S. S. S. (2012). Acoustic enhancement of heat transfer in furnace tubes. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 59, 36-42.
- [32] Douglas, Z., Boziuk, T. R., Smith, M. K. & Glezer, A. (2012). Acoustically enhanced boiling heat transfer. *Physics of Fluids*, 24 (5), 052105.
- [33] Chen, S. W., Liu, F. C., Lin, H. J., Ruan, P. S., Su, Y. T., Weng, Y. C., Wangac, J.-R., Leed, J.-D. & Lin, W. K. (2018). Experimental test and empirical correlation development for heat transfer enhancement under ultrasonic vibration. *Applied Thermal Engineering*, 143, 639-649.
- [34] Zhang, N. & Du, Y. (2018). Ultrasonic enhancement on heat transfer of palmitic-stearic acid as PCM in unit by experimental study. *Sustainable Cities and Society*, 43, 532-537.
- [35] Sadek, H., Robinson, A. J., Cotton, J. S., Ching, C. Y. & Shoukri, M. (2006). Electro-hydrodynamic enhancement of in-tube convective condensation heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49 (9-10), 1647-1657.
- [36] Sadek, H., Ching, C. Y. & Cotton, J. (2010). The effect of pulsed electric fields on horizontal tube side convective condensation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53 (19-20), 3721-3732.