

# VERIFICACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS CORRELACIONES DE TRANSFERENCIA DE CALOR POR EBULLICIÓN EN PELÍCULA, EN PISCINA, EN TORNO A ESFERAS

R. Arévalo\*, L. Rebollo°, A. Abánades°, J. Muñoz°, R. Omaña\*, O. Pérez\*

\* Universidad Nacional Experimental del Táchira (UNET), Táchira, Venezuela

° Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Madrid, España

\*e-mail: rarevalo@unet.edu.ve

## RESUMEN

La ebullición en película es el mecanismo de transferencia de calor básico que acopla térmicamente un líquido y una superficie caliente cuando existe una gran diferencia de temperatura entre ambos. El conocimiento preciso del comportamiento de este mecanismo térmico en torno a esferas es necesario para el análisis de seguridad de escenarios industriales en los que exista contacto entre un líquido y un material fundido fragmentado, generalmente en piezas esféricas, y resulta esencial para garantizar la seguridad de los reactores nucleares ante escenarios accidentales de muy baja probabilidad, pero de gran severidad, en los que se postule la rotura en guillotina del circuito de refrigeración del reactor simultánea al fallo total activo del sistema de refrigeración de emergencia del núcleo. En tal hipotético escenario, se produciría la fusión del combustible en el plazo de algunas horas, con dispersión y relocalización de fragmentos sólidos esféricos a muy alta temperatura. Para hacer frente a este escenario se precisa desarrollar procedimientos automáticos y manuales de operación de emergencia, resultando imprescindible disponer de modelos térmicos confiables, con un calificado soporte experimental, que permitan analizar de forma realista la refrigeración por ebullición en película, en modo ebullición en piscina, de las geometrías esféricas sólidas resultantes. En el presente trabajo UNET-UPM abordan la verificación de las correlaciones más conocidas para ebullición en película en piscina en torno a esferas, mediante la comparación de las mismas con los resultados experimentales obtenidos por Liu-Theofanous. Algunos de los aspectos resaltantes son la limitada aplicabilidad de la correlación empírica de Frederking-Clark, el buen ajuste que muestran las correlaciones de Tou-Tso y de Grigoriew frente a los datos experimentales usados, y las deficiencias que muestran las correlaciones que toman en cuenta el subenfriamiento del líquido, sobre todo a altos niveles de subenfriamiento. En una futura segunda fase de esta investigación, de tipo analítica-numérica-experimental, se abordará en el desarrollo de nuevas correlaciones semi-empíricas, de mejor ajuste, que permitan una mejor capacidad predictiva en los modelos.

PALABRAS CLAVE: Correlación, ebullición, película, piscina, esfera.

## INTRODUCCIÓN

La ebullición en película es el mecanismo de transferencia de calor básico que acopla térmicamente un líquido y una superficie caliente cuando existe una gran diferencia de temperatura entre ambos. La ebullición en película se caracteriza porque el líquido y la superficie calefactora no toman contacto, ya que las separa una película de vapor sobrecalentado. La transferencia de calor por radiación, despreciable en ebullición nucleada y en ebullición de transición, puede llegar a ser muy importante en la ebullición en película, particularmente cuando se trate de materiales de alta emisividad con una temperatura superficial superior en más de 700 °C a la de saturación del líquido.

El conocimiento preciso del comportamiento físico convectivo-radiante de este mecanismo térmico en torno a esferas resulta esencial, en particular, para el análisis de seguridad de los reactores nucleares ante escenarios accidentales de muy baja probabilidad, pero de gran severidad, en los que se postule la rotura en guillotina del circuito de refrigeración del reactor simultánea al fallo total activo del sistema de refrigeración de emergencia del núcleo. En tal hipotético escenario, se produciría la fusión del combustible en el plazo de algunas horas, con dispersión y relocalización de fragmentos sólidos esféricos de alta emisividad y con muy alta temperatura.

Desde 1963, cuando Frederking y Clark desarrollaron la primera correlación para ebullición en película en piscina en torno a esferas, han sido planteadas por diversos investigadores y grupos de investigación una significativa cantidad de nuevas correlaciones. Algunas de ellas provienen de estudios analíticos, en tanto que otras son netamente empíricas o son la conjugación de ambos aspectos, es decir, correlaciones semi-empíricas que son producto de un desarrollo teórico previo y una posterior modificación para ajustarla a los datos experimentales disponibles, arrastrando, obviamente, la incertidumbre asociada a la imprecisión de las medidas.

Algunas correlaciones son válidas solamente para condiciones de líquido saturado en torno a la esfera, mientras que otras son de carácter más general y pueden considerar al líquido tanto saturado como con subenfriamiento.

Para orientar la línea detallada de investigación a seguir por UNET-UPM, en el presente estudio se han seleccionado siete de las correlaciones más conocidas en esta temática, como son las siguientes: Frederking-Clark (analítica), Frederking-Clark (empírica), Tou-Tso, Grigoriew, Dhir-Purohit, Michiyoshi y Liu-Theofanous. Las cuatro primeras son aplicables solamente para condiciones de líquido saturado y las tres últimas para líquido saturado o subenfriado. Estas correlaciones se muestran en la tabla 1.

## EL TRABAJO EXPERIMENTAL DE LIU Y THEOFANOUS

En 1994, Liu y Theofanous [1] estudiaron teórica y experimentalmente la ebullición en película en torno a esferas, no sólo en piscina, en condiciones de convección libre, sino también con circulación forzada del fluido, con la intención de establecer una correlación de propósito general. En cuanto a la ebullición en piscina, estos investigadores llevaron a cabo experimentos sistemáticos con agua y esferas de acero inoxidable para determinar el efecto del subenfriamiento del líquido (0 a 30°C), el del sobrecalentamiento de la esfera (250 a 800°C) y el del diámetro de la esfera (6 a 19 mm) sobre el coeficiente de transferencia de calor.

Este trabajo recibió el premio como el mejor artículo de investigación presentado en la reunión de 1995 de la División de Termohidráulica de la Sociedad Nuclear Americana [2].

## COMPARACIÓN DE LAS CORRELACIONES CON DATOS EXPERIMENTALES

A continuación se presenta la verificación de las correlaciones indicadas anteriormente, comparando sus resultados con los datos experimentales de Liu y Theofanous. Esta comparación se realiza a través de gráficos que muestran el cociente entre el coeficiente de transferencia de calor total calculado por la correlación y el determinado experimentalmente. Para facilitar la interpretación se muestran las bandas superior e inferior entre las cuales están contenidos todos los datos, permitiendo así visualizar los porcentajes de desviación de cada una de las correlaciones analizadas.

### Correlación de Frederking-Clark (Analítica)

Frederking y Clark (1963) fueron los primeros en reportar una solución analítica para la ebullición en película en piscina en torno a esferas, con líquido en condición de saturación, mediante un análisis similar al usado por Bromley para cilindros horizontales.

En la figura 1 se aprecia cómo esta correlación siempre subestima los valores del coeficiente de transferencia de calor total entre 11 y 24%. Estas discrepancias fueron observadas en su momento por Frederking y Clark, quienes generaron posteriormente una correlación empírica que se ajustara mejor a los datos experimentales de los cuales disponían. La correlación de Frederking-Clark (Analítica) tiene a su favor una banda estrecha entre los límites inferior y superior de apenas 13%, por lo que puede pensarse que un incremento en la constante numérica 0.586 de esta correlación, permitiría mejorar los resultados obtenidos con ella.

#### Correlación de Frederking-Clark (Empírica)

En virtud de que su correlación analítica no se ajustaba bien a sus datos experimentales, Frederking y Clark elaboraron un modelo empírico que, a la vez que ajustaba el coeficiente y el exponente del modelo teórico, modificaba el módulo adimensional  $Sp$ , que pasó a denominarse  $Sp'$  (módulo  $Sp$  modificado) aplicando el criterio desarrollado por Bromley, en 1950, de modificar el calor de cambio de estado ( $h_{fg}$ ) que pasó a denominarse  $h'_{fg}$  (calor de cambio de estado modificado). De esta forma Frederking y Clark, al igual que Bromley, tuvieron en cuenta que el vapor de la película no se encuentra saturado sino que tiene un perfil de temperaturas que se extiende desde la de saturación (en la interfase con el líquido), hasta la correspondiente a la superficie calefactora, en la posición límite de contacto con ella, por lo que se trata de vapor sobrecalentado, de manera que el empleo de  $h'_{fg}$  es una forma sencilla de considerar que el flujo térmico convectivo-radiante aportado por el elemento calefactor se emplea en vaporizar el líquido y en sobrecalentar el vapor formado. En la figura 2 puede observarse el resultado de comparar esta correlación con los datos experimentales de Liu-Theofanous, apreciándose que los resultados de la correlación concuerdan con los experimentales en una banda de +2% a -27%. Esto indica que este modelo casi siempre subestima el coeficiente de transferencia de calor. La inexistente mejora sustancial respecto a la correlación analítica se debe a que esta correlación no toma en cuenta el efecto del diámetro sobre el coeficiente de transferencia de calor, al ser una correlación elaborada según la ley de potencia  $1/3$ . Sin embargo, se observa en la figura 2 que todos los datos correspondientes a los diámetros de 12.7 y 19.1 mm, se encuentran dentro de una banda mucho más estrecha y bastante aceptable de +2% a -10%, lo que indica que esta correlación tiene una precisión muy buena pero para un rango muy restringido de diámetros.

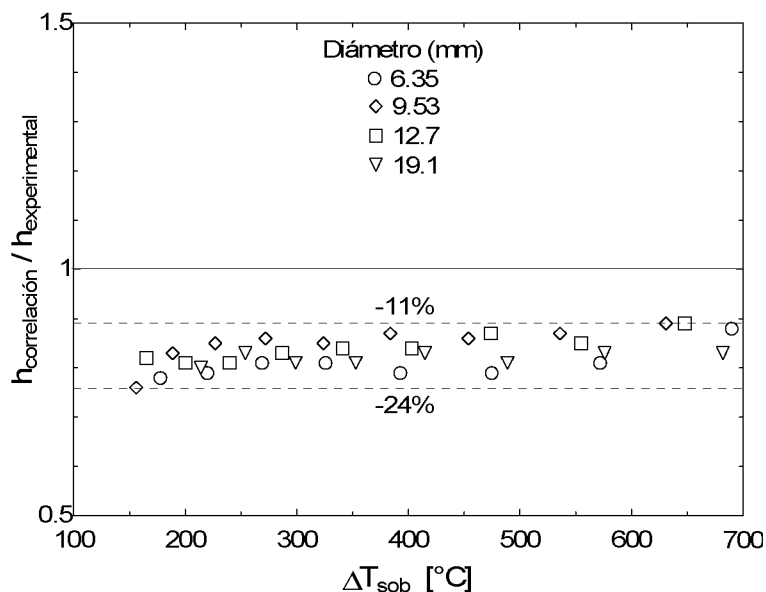


Figura 1. Comparación de la correlación de Frederking-Clark (Analítica) con los datos experimentales de Liu-Theofanous para condiciones de líquido saturado.

#### Correlación de Tou-Tso

En 1997, Tou y Tso plantearon una solución analítica con la idea de mejorar el modelo analítico de Frederking y Clark. De la observación de ambas correlaciones, resalta el incremento de la constante numérica de 0.586 a 0.707. Como puede verse en la figura 3, este modelo permite obtener resultados acordes con los experimentales dentro de la banda de incertidumbre de +10% a -7%

Tabla 1. Correlaciones para ebullición en película en piscina en torno a esferas

Autor(es)	Correlación	Año	Condición del Líquido
Frederking-Clark (Analítica) [3]	$Nu = 0.586 \left( \frac{Ar}{Sp} \right)^{1/4}$	1963	Saturado
Frederking-Clark (Empírica) [3]	$Nu = 0.14 \left( \frac{Ar}{Sp'} \right)^{1/3}$	1963	Saturado
Tou-Tso [3]	$Nu = 0.707 \left( \frac{Ar}{Sp'} \right)^{1/4} + 2$	1997	Saturado
Grigoriew [1]	$Nu = 0.7Ar^{1/4} Pr_v^{1/3} f_1(K) \quad \text{para } Ar < 3 \times 10^7$ $f_1(K) = \begin{cases} 1.0 & \text{si } K \leq 1.4 \\ 0.92K^{1/4} & \text{si } K > 1.4 \end{cases}$ $Nu = 0.165Ar^{1/3} Pr_v^{1/3} f_2(K) \quad \text{para } Ar \geq 3 \times 10^7$ $f_2(K) = \begin{cases} 1.0 & \text{si } K \leq 1.6 \\ 0.85K^{1/3} & \text{si } K > 1.6 \end{cases}$ $K = \frac{h_{fg}}{C_{p,v} \Delta T_{sob}}$	1982	Saturado
Dhir-Purohit [4]	$Nu_t = Nu_{sat} + \frac{Pr_v k_v}{C_{p,v} \mu_v} Nu_r + Nu_{nc} \left( \frac{Sc}{Sp} \right) \left( \frac{\mu_l}{\mu_v} \right)$ $Nu_{sat} = 0.8 \left( \frac{Ar}{Sp} \right)^{1/4} \quad Nu_{nc} = 0.5(Gr Pr_l)^{1/4}$	1978	Subenfriado
Michiyoshi [1]	$Nu = 0.696 \left( \frac{Ar}{Sp'} \right)^{1/4} M_c^{1/4}$ $M_c = \frac{E^3}{\left( 1 + \frac{E}{Sp' Pr_l} \right) (R Pr_l Sp')^2}$ $E = (A + C\sqrt{B})^{1/3} + (A - C\sqrt{B})^{1/3} + \frac{1}{3} Sc_m$ $A = \frac{1}{27} Sc_m^3 + \frac{1}{3} R^2 Sp' Pr_l Sc_m + \frac{1}{4} R^2 Sp'^2 Pr_l^2$ $B = -\frac{4}{27} Sc_m^2 + \frac{2}{3} Sp' Pr_l Sc_m - \frac{32}{27} Sp' Pr_l R^2 + \frac{1}{4} Sp'^2 Pr_l^2 + \frac{2}{27} \frac{Sc_m^3}{R^2}$ $C = \frac{1}{2} R^2 Sp' Pr_l \quad Sc_m = \frac{C_{p,l} \Delta T_{sub}}{h'_{fg}}$	1988	Subenfriado
Liu-Theofanous [1]	$\frac{Nu}{1 + \frac{2}{Nu}} = K(D^*) \left( \frac{Ar}{Sp'} \right)^{1/4} M_c^{1/4}$ $K(D^*) = 0.5D^{*-1/4} \quad \text{para } D^* < 0.14$ $K(D^*) = \frac{0.86}{1 + 0.28D^*} \quad \text{para } 0.14 \leq D^* < 1.25$ $K(D^*) = \frac{2.4D^*}{1 + 3D^*} \quad \text{para } 1.25 \leq D^* \leq 6.6$ $K(D^*) = 0.47D^{*1/4} \quad \text{para } D^* > 6.6$ $M_c \text{ se calcula igual que en Michiyoshi, pero con } Sc_m = \frac{0.93 Pr_l^{0.22} C_{p,l} \Delta T_{sub}}{h'_{fg}}$	1994	Subenfriado

### Correlación de Grigoriew

En 1982, Grigoriew, Klimenko y Shelepen combinaron leyes de potencia  $\frac{1}{4}$  y  $\frac{1}{3}$ , para cuantificar el efecto del diámetro en la ebullición en película en torno a esferas, con el líquido en condición de saturación. Ellos usaron la ley de potencia  $\frac{1}{4}$  cuando el diámetro es pequeño y la ley de potencia  $\frac{1}{3}$  cuando el diámetro es grande. La figura 4 muestra la comparación de los resultados de esta correlación con datos experimentales, apreciándose que la correlación subestima el coeficiente de transferencia de calor entre 3 y 17%. Al igual que lo que ocurre con la correlación analítica de Frederking y Clark, la banda es estrecha (14%), por lo que algunos ajustes en los coeficientes de esta correlación que permitan desplazar esta banda hacia arriba podrían permitir obtener un muy buen modelo para la ebullición en película en condición de saturación, en piscina, en torno a esferas.

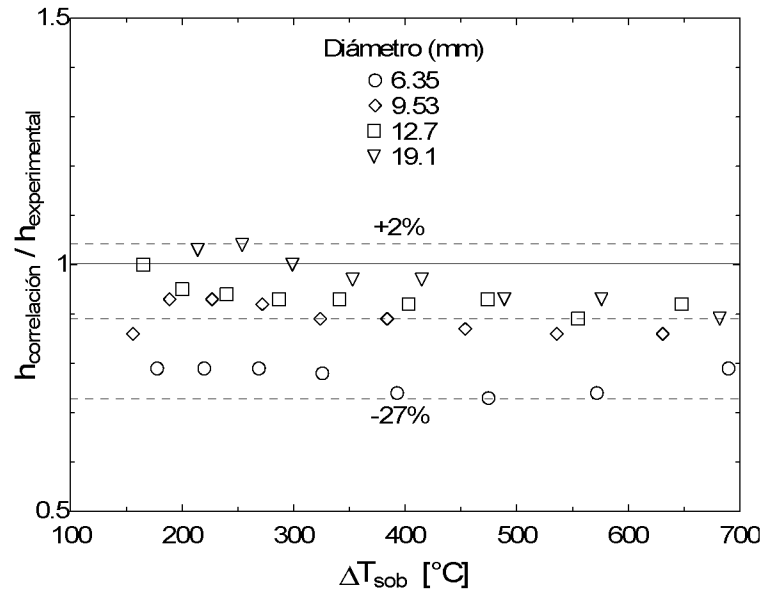


Figura 2. Comparación de la correlación de Frederking-Clark (Empírica) con los datos experimentales de Liu-Theofanous para condiciones de líquido saturado.

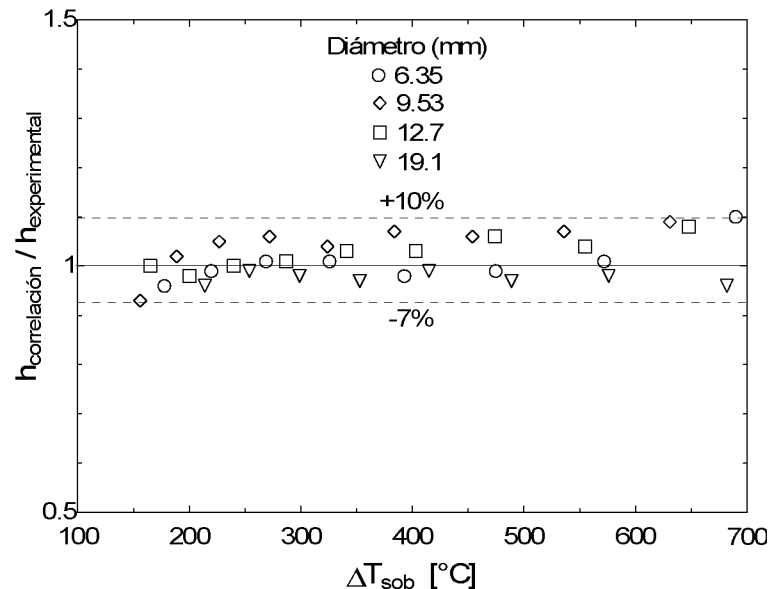


Figura 3. Comparación de la correlación de Tou-Tso con los datos experimentales de Liu-Theofanous para condiciones de líquido saturado.

### Correlación de Dhir-Purohit

Dhir y Purohit en 1978 obtuvieron una correlación para ebullición en película en piscina con condiciones de líquido saturado o subenfriado, a partir de sus experimentos con esferas de acero, cobre y plata, de 19 y 25.4 mm de diámetro. Su correlación, como puede apreciarse en la figura 5, sobreestima el coeficiente de transferencia de calor entre 3 y 23%.

### Correlación de Michiyoshi

Michiyoshi, Takahashi y Kikuchi (1988) obtuvieron una correlación general para ebullición en película en piscina con líquido saturado o subenfriado, a través de un análisis con el método integral, aplicable a placas verticales, cilindros horizontales y esferas. Su correlación (figura 6) permite calcular el coeficiente de transferencia de calor con una desviación de +4 a -21%. También puede indicarse que, para condiciones de líquido saturado, esta correlación subestima el coeficiente de transferencia de calor entre un 5 y un 21%.

### Correlación de Liu-Theofanous

Los autores de esta correlación se apoyaron en las conclusiones del trabajo analítico de Michiyoshi que determinó que el coeficiente de transferencia de calor para ebullición en película en piscina en torno a esferas es 14% mayor que para cilindros. En función de esto, amplificaron la bastante elaborada y probada correlación de Sakurai para cilindros horizontales en un 14%. Es muy importante resaltar que el artículo de Sakurai donde realiza el desarrollo de su correlación fue premiado en 1991 por la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME) con la medalla "Melville", que es un premio que entrega esta organización anualmente desde 1914 al artículo más original [5].

En la figura 7 se observa que las predicciones del modelo de Liu-Theofanous están de acuerdo con los datos experimentales en una banda de +19% a -15%. También se aprecia que las mayores desviaciones se presentan para subenfriamientos grandes del líquido y para diámetros pequeños de la esfera. Para condiciones de saturación del líquido, esta correlación trabaja con una banda de +5 a -15% de desviación, manteniendo de nuevo la tendencia observada en las previas de predecir valores inferiores a las medidas experimentales.

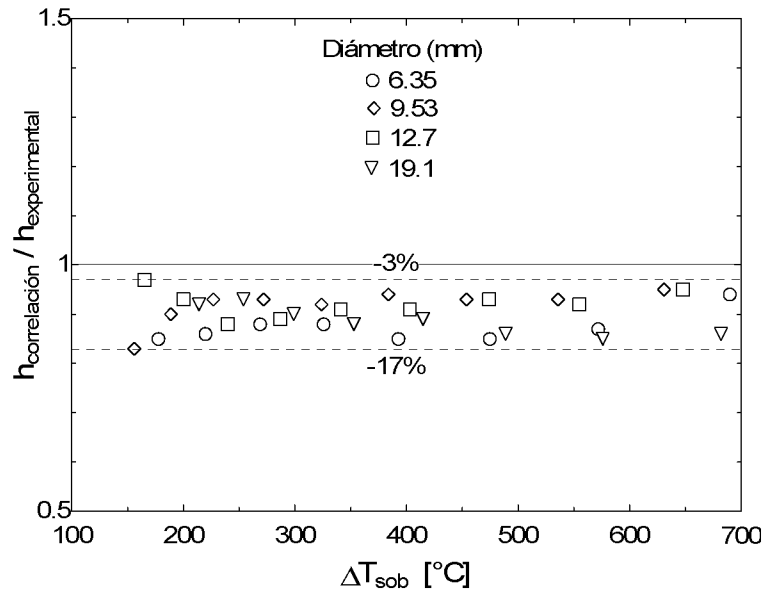


Figura 4. Comparación de la correlación de Grigoriew con los datos experimentales de Liu-Theofanous para condiciones de líquido saturado.

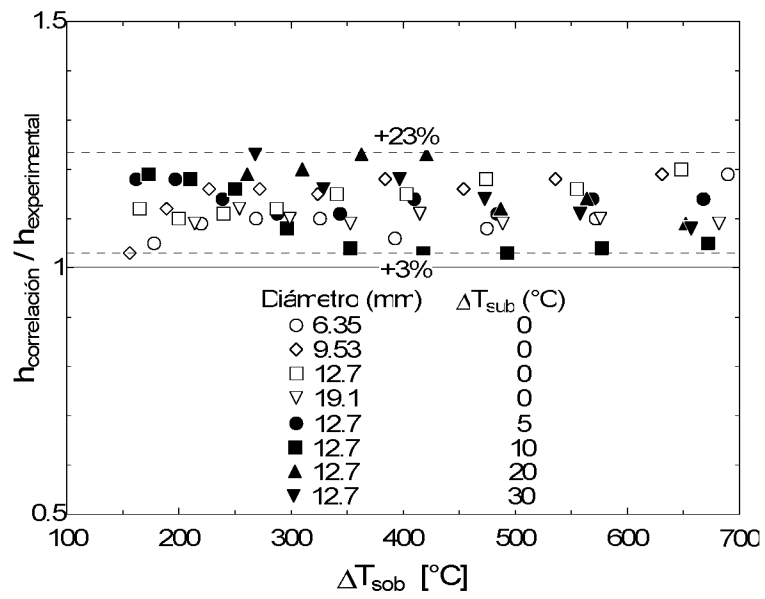


Figura 5. Comparación de la correlación de Dhir-Purohit con los datos experimentales de Liu-Theofanous para condiciones de líquido saturado y subenfriado

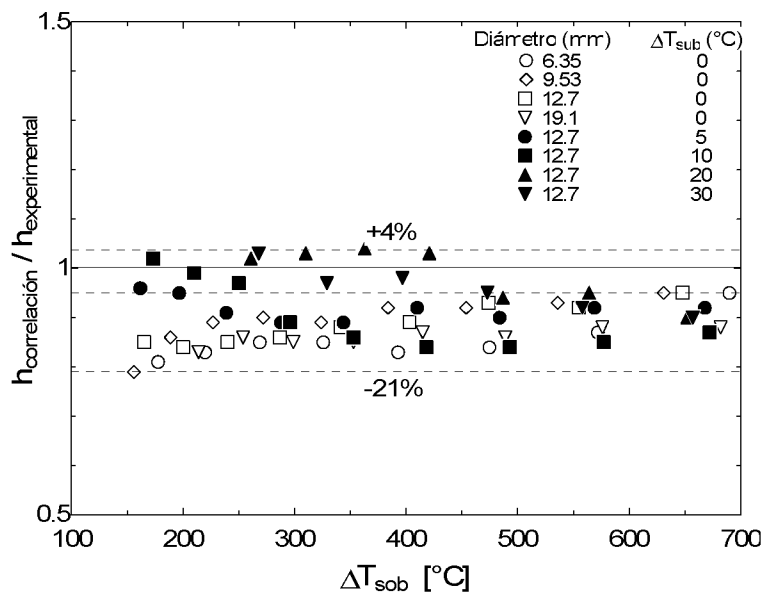


Figura 6. Comparación de la correlación de Michiyoshi con los datos experimentales de Liu-Theofanous para condiciones de líquido saturado y subenfriado

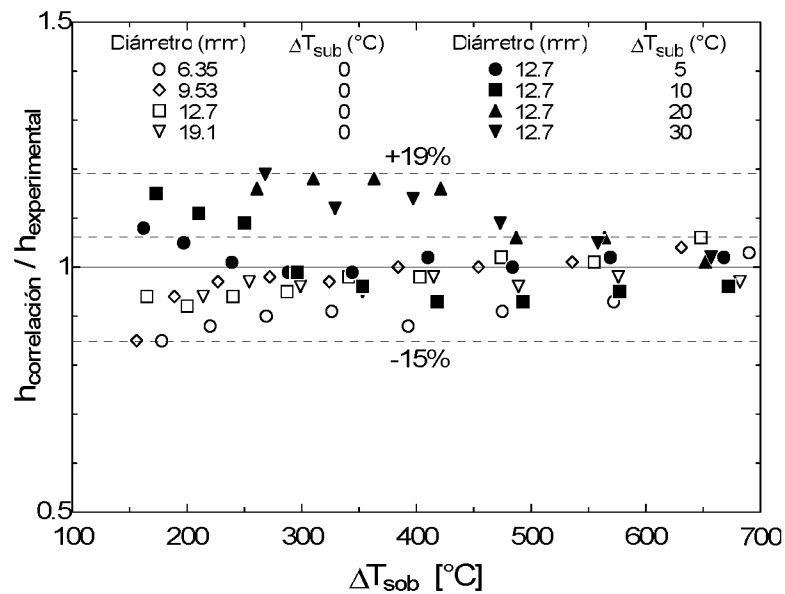


Figura 7. Comparación de la correlación de Liu-Theofanous con sus datos experimentales para condiciones de líquido saturado y subenfriado

## CONCLUSIONES

La correlación de Grigoriew y la de Tou-Tso, que es una modificación de la correlación analítica de Frederking y Clark, son las que mejor ajuste muestran frente a los datos experimentales utilizados, para condiciones de saturación del líquido. Por su parte, las correlaciones generales que toman en cuenta el subenfriamiento del líquido (Dhir-Purohit, Michiyoshi y Liu-Theofanous) presentan desviaciones mayores que las elaboradas específicamente para condiciones de saturación del líquido, observándose que dichas desviaciones crecen y se acentúan con el subenfriamiento, lo que debe interpretarse como una carencia en la física de algunos de estos modelos, por lo que se trata de un aspecto identificado que es necesario mejorar en el modelado de esta temática para reducir la desviación actualmente existente.

La correlación empírica de Frederking y Clark se ve notoriamente afectada por el diámetro de la esfera, ya que no toma en cuenta este parámetro en la estructura de su algoritmo de cálculo, lo que limita su aplicación a un rango restringido de diámetros.

Por otra parte, la correlación analítica de Frederking y Clark, al igual que la de Grigoriew, subestima el valor del coeficiente de transferencia de calor, mientras que la de Dhir-Purohit lo sobreestima.

Dado que el coeficiente de transferencia de calor total en ebullición en película, en piscina, en torno a una esfera, es el resultado del acoplamiento minorado de los componentes individuales convectivo y radiante, resulta esencial la precisión de los modelos que calculen cada uno de estos dos términos de forma separada, así como el rigor físico del modelo de acoplamiento minorador de ambos, sobre todo a altas temperaturas superficiales donde la radiación térmica infra-roja toma importancia, y en particular en los casos de alta emisividad superficial. Una de las necesidades actuales, identificada por investigadores de reconocido prestigio en esta temática, como es el caso de Dombrovskii [6], es la generación de modelos de acoplamiento convectivo-radiante que tomen en cuenta las características espectrales diferenciales de absorción de radiación infra-roja en el líquido y en el vapor, así como la geometría de la película de vapor, dado que los modelos existentes actualmente han sido elaborados en base a una serie de simplificaciones que les restan precisión para el análisis de casos complejos, por lo que las futuras investigaciones analíticas-numéricas-experimentales de UNET-UPM se dirigirán en estas dos direcciones de forma combinada.



## REFERENCIAS

1. C. Liu y T.G. Theofanous, Film Boiling on Spheres in Single and Two Phase Flows, University of California, pp. 1-259, 1994.
2. Página web de la División Termohidráulica de la Sociedad Nuclear Americana: <http://thd.ans.org/ExCommittee/Minutes/ec960803.html>
3. S.K.W. Thou y C.P. Tso, Improvement on the Modelling of Film Boiling on Spheres, Int. Comm. Heat Mass Transfer, Volumen 24, No. 6, pp. 879-888, 1997.
4. V.K. Dhir y G.P. Purohit, Subcooled Film Boiling Heat Transfer from Spheres, University of California, Nuclear Engineering and Design, Volumen 47, pp. 49-66, 1978.
5. Página Web del Laboratorio Shiotsu de la Universidad de Kyoto, Japón: [http://www.pe.energy.kyoto-u.ac.jp/English/Melville\\_e.htm](http://www.pe.energy.kyoto-u.ac.jp/English/Melville_e.htm)
6. L.A. Dombrovskii, Heat Transfer by Radiation through a Vapor Gap under Conditions of Film Boiling of Liquid, Heat and Mass Transfer and Physical Gasdynamics, Volumen 41, No. 6, pp. 819-824, 2003.

## UNIDADES Y NOMENCLATURA

Ar	Número de Arquímedes (adimensional)
c	Convección
$C_p$	Calor específico (J/kgK)
D	Diámetro (m)
$D^*$	Parámetro que representa el diámetro (adimensional)
g	Aceleración de gravedad ( $m/s^2$ )
Gr	Número de Grashof (adimensional)
h	Coefficiente de transferencia de calor ( $W/m^2K$ )
$h_{fg}$	Entalpía de vaporización (J/kg)
$h^*_{fg}$	Entalpía de vaporización modificada (J/kg)
k	Conductividad térmica
l	Líquido
L	Longitud característica del domo de la película de vapor (m)
nc	Convección natural
Nu	Número de Nusselt (adimensional)
Pr	Número de Prandtl (adimensional)
r	Radiación
s	Superficie
sat	Saturación
$Sc, Sc_m, Sc^*$	Parámetro que representa el subenfriamiento (adimensional)
$Sp, Sp^*$	Parámetro que representa el sobrecalentamiento (adimensional)
t	Total
T	Temperatura (K)
v	Vapor
$\lambda_c$	Longitud de onda crítica (m)
$\mu$	Viscosidad absoluta (kg/ms)
$\rho$	Densidad ( $kg/m^3$ )
$\sigma$	Tensión superficial (N/m)
$\nu$	Viscosidad cinemática ( $m^2/s$ )
$\Delta T_{sob}$	Sobrecalentamiento (K)
$\Delta T_{sub}$	Subenfriamiento (K)