

Determinación experimental del coeficiente de transferencia de calor por convección natural en la superficie de un esfera de cobre

págs. 19-30

Línea de investigación: Fluidos y Térmicas

Silvio Alejandro Jiménez• Luis Carlos Rativa Prieto**

Fundación Universitaria los libertadores – Fluidos y Térmicas

Recibido: 16 de octubre de 2013 Aceptado: 27 de noviembre de 2013

RESUMEN

En este documento, se estimó el coeficiente promedio de transferencia de calor por convección natural sobre la superficie de una esfera de cobre caliente que se enfría al aire ambiental.

Experimentalmente, se obtuvieron los valores de $17.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ y de $18.62 \text{ W/m}^2\text{K}$. Para comparar, se calculó el valor de $15.03 \text{ W/m}^2\text{K}$ con las correlaciones empíricas de la literatura especializada. Los coeficientes estimados presentan un buen acuerdo con los publicados en la literatura. También, se determinaron los campos escalares transitorios de temperatura por medio de cuatro experimentos computacionales, para determinar cuál se acercaba más al proceso real de enfriamiento. Las temperaturas finales de la esfera concuerdan bien con la temperatura final medida experimentalmente.

Palabras claves: transferencia de calor, convección natural, coeficiente promedio, estado transitorio.

ABSTRACT

In this paper, the natural convection average heat transfer coefficient on the surface of a hot copper sphere was estimated when it cooled down to the environmental air.

Experimentally, values of $17.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ and $18.62 \text{ W/m}^2\text{K}$ were obtained. For comparison, the value of $15.03 \text{ W/m}^2\text{K}$ was calculated with empirical correlations of the literature. The estimated coefficients show good agreement with those published in the literature. Also, the scalar transient temperature fields were determined by four computational experiments in order to determine which is closer to the real cooling process. The final temperatures of the sphere agree well with those experimentally measured.

Keywords: heat transfer, natural convection, average coefficient, the transitory state.

• Ingeniero mecánico Universidad Nacional de Colombia. Magíster en Docencia Universidad de la Salle. Director del grupo de investigación GIDAD mecánica. Línea de investigación: Calidad ambiental y producción más limpia, sublínea: Aplicaciones de las fuentes de energía renovable. Fundación Universitaria los libertadores. Correo electrónico: sajimenezc@libertadores.edu.co

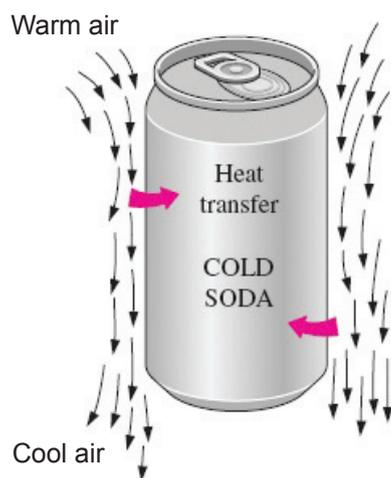
** Aspirante al título de ingeniero mecánico Fundación Universitaria Los Libertadores. Miembro del semillero de investigación de ingeniería mecánica RETP DIVISION SOLAR. Línea de investigación: Calidad ambiental y producción más limpia. Correo: lcrativap@libertadores.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Cuando se encuentra una superficie en contacto con un fluido, y éste se encuentra en movimiento relativo respecto a aquella, y hay una diferencia de temperatura entre dicha superficie y el fluido, se presenta la transferencia de calor por convección (Figura 1). Esta tasa se puede hallar por la ley de enfriamiento de Newton (Incropera, 1999):

$$\dot{Q} = \bar{h} * A_s * (T_s - T_{\infty}) \quad (1)$$

Figura 1. Calentamiento de una bebida fría en un ambiente cálido por convección natural (Cengel, 2007)



donde \bar{h} es el coeficiente de convección o de película, A_s el área de contacto entre la superficie y el fluido y $(T_s - T_{\infty})$ es la diferencia de temperaturas entre la superficie y el fluido en movimiento.

La transferencia de calor por convección puede ser con cambio de fase o sin él. Dentro de esta última categoría, la convección puede ser natural o forzada. La convección es forzada cuando el movimiento del fluido es producido por una diferencia de presiones, provocada por agentes externos. En la natural, el movimiento del fluido es ocasionado por la diferencia en las fuerzas de flotación, provocado por un gradiente de densidad del fluido, causado por un gradiente de temperatura, todo esto sucede bajo la acción de un campo gravitacional o de un campo centrífugo.

El coeficiente de convección puede ser local o global, según se quiera calcular la transferencia de calor en un punto de una superficie o en todos los puntos de esa superficie. Este coeficiente no es una propiedad del fluido que se pueda encontrar en tablas, ya que depende de muchas variables tales como las propiedades del fluido, la diferencia de temperaturas superficie – flujo, el régimen del flujo (laminar o turbulento) y de la geometría de la superficie, lo que hace de su determinación un asunto complejo.

Se puede determinar de manera teórica, mediante soluciones analíticas exactas o aproximadas, la analogía entre las transferencias de masa, energía y momento o por métodos numéricos. Spalding & Pun (1961) hicieron un revisión de 15 métodos teóricos para predecir el coeficiente de transferencia de calor por convección para flujos de capa límite laminar con propiedades uniformes y concluyeron que, cuando éstos se aplican a un problema en particular, la exactitud y el trabajo computacional varían de un método a otro. También, se dieron cuenta que la exactitud no guarda una relación directa con la cantidad de trabajo computacional. Chen & Mucoglu (1977) y Yang et al. (2007) analizaron numéricamente la convección natural y la convección mixta para flujos laminares sobre esferas, respectivamente.

A pesar de los modelos teóricos, la manera más frecuente que se utiliza para determinar este coeficiente es la experimental, que puede comprender montajes de estado estable y de estado transitorio. Douglas Kirk & Johnson (1986) estudiaron la pérdida de calor desde esferas para un amplio rango de ángulos entre flujos forzado y naturales de convección. Rojas Diéguez (2009), junto con sus estudiantes del curso de termodinámica de la Facultad de Ingeniería de la universidad Rafael Landívar, construyeron un aparato de manufactura casera para determinar, experimentalmente, el coeficiente de convección forzada sobre una esfera de cobre de 1" de diámetro.

Este documento presenta los materiales utilizados, el procedimiento experimental seguido, los resultados obtenidos y las conclusiones que se infieren de un experimento de transferencia de calor transitoria para determinar el coeficiente global para la convección natural sobre una esfera isotérmica. El estudio permitió demostrar que los modelos teóricos de transferencia de calor suministrados en los libros de texto son aproximaciones válidas y útiles en aplicaciones prácticas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Montaje experimental

Los materiales utilizados para el desarrollo del experimento fueron: una esfera de cobre de 49.88 mm de diámetro y 588.6 g de masa; un generador de vapor (PASCO Model TD-8558A) para incrementar la temperatura del agua, donde se sumergió y se calentó la esfera de cobre; un calibrador Pie de Rey, con incertidumbre de ± 0.05 mm; una balanza digital con una incertidumbre de ± 0.1 g; dos termocuplas de contacto 80 PK-1: una para sensar la temperatura de la esfera y la otra para sensar la temperatura ambiente, ambas con una incertidumbre de ± 0.1 °C; dos multímetros BK PRECISION, con puerto hembra para mini conector macho de termocupla tipo K; un cronómetro, con una incertidumbre de ± 0.01 s; un soporte universal, conformado por base, dos varillas y una nuez doble; cinta adhesiva e hilo. En las figuras 2 y 3, se muestran dos imágenes fotográficas del montaje experimental.

Figura 2. Multímetro, termocupla, esfera, soporte y cronómetro utilizados en el experimento

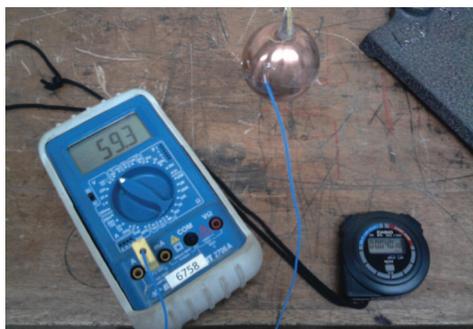


Figura 3. Generador de vapor utilizado para calentar la esfera del experimento



2.2. Procedimiento experimental y cálculos

El procedimiento para la determinación del coeficiente de convección se inició con las mediciones del diámetro y de la masa de la esfera, así como de la temperatura promedio ambiente. Para determinar el material de la esfera, se calculó el volumen de la esfera y, después se procedió, a estimar su densidad. Se calibraron las termocuplas tipo K, sumergiéndolas en agua y comparando la lectura de la temperatura en las pantallas de los multímetros BK PRECISION con la correspondiente de un termómetro capilar de mercurio. Se ató un pedazo de hilo a la argolla de la esfera y este conjunto, a su vez, fue suspendido del soporte universal. Para incrementar la temperatura de la esfera, se vertió agua hasta los $\frac{3}{4}$ de la capacidad del recipiente del generador de vapor y se sumergió aquella totalmente (Figura 4). Se encendió el generador y, una vez que el agua hirvió, se retiró la esfera y, a continuación, se adhirió, con cinta adhesiva, la termocupla a un punto fijo de la esfera y se dejó expuesta al aire ambiente del laboratorio (Figura 5). Finalmente, se registraron la temperatura de la esfera y la temperatura ambiente cada 5 s durante el primer minuto del proceso de enfriamiento, cada 10 s durante el segundo minuto, cada 15 s durante el tercero y cada 20 s del cuarto minuto en adelante hasta completar los 10 minutos.

Figura 4. Aumento de temperatura de la esfera al sumergirla en agua calentada en el generador de vapor.

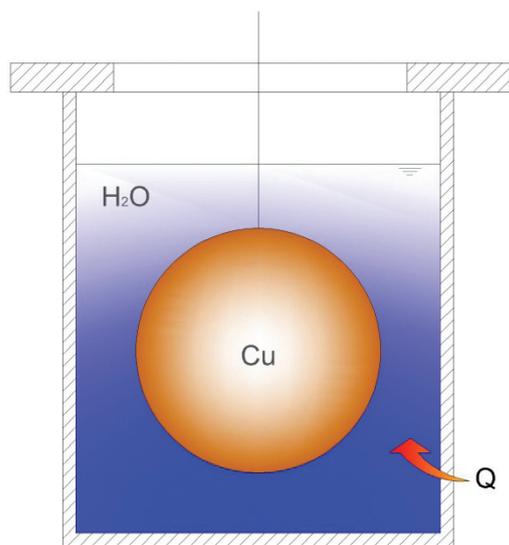
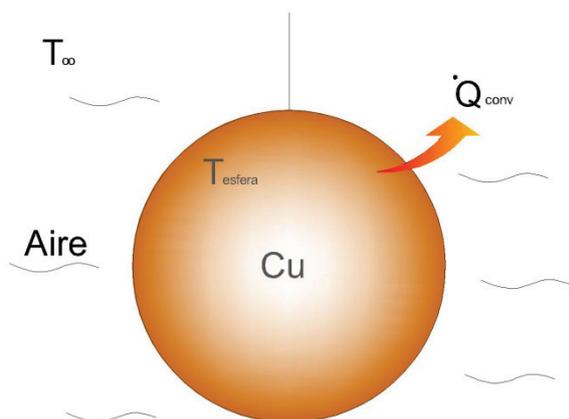


Figura 5. Esfera expuesta al aire ambiente. (Te>T∞)



Si se asume que los gradientes espaciales de temperatura y la transferencia neta de calor por radiación son despreciables y, por lo tanto, se puede hacer un análisis de conducción transitoria por el método de sistemas concentrados (también llamado de resistencia interna despreciable), el coeficiente promedio de convección natural para la esfera se encuentra relacionado con la temperatura de la esfera, la temperatura ambiente y el tiempo de enfriamiento por medio de la ecuación 2

$$\bar{h} = \frac{-\ln \left[\frac{T_e - T_\infty}{T_{oe} - T_\infty} \right]^* [\rho V_e C_p]}{A_e * t} \tag{2}$$

donde T_e es la temperatura de la esfera en cualquier instante de tiempo, T_∞ es la temperatura ambiente en cada instante de tiempo, T_{oe} , ρ , A_e , V_e y C_p son la temperatura inicial, la densidad, el área superficial, el volumen y el calor específico de la esfera, respectivamente.

Por otro lado, si se despeja de la ecuación 2 la temperatura de la esfera T_e se tiene

$$T_e = (T_{oe} - T_\infty) e^{\frac{-\bar{h}A_e t}{\rho C_p V_e}} + T_\infty \tag{3}$$

donde el exponente de la función exponencial puede conocerse al hacer una regresión exponencial del diagrama de dispersión de los datos de temperatura de la esfera en función del tiempo. Conocido este valor, se puede determinar el coeficiente de convección para todo el proceso de enfriamiento de la esfera.

Para saber si la suposición de despreciar los efectos espaciales de temperatura es válida, el número adimensional denominado Biot debe ser menor que 0.1. El Biot se calcula de la expresión

$$Bi = \frac{\bar{h}L_c}{k} = \frac{\bar{h}V_e}{kA_e} = \frac{\bar{h}D}{6k_{cu}} < 0.1 \tag{4}$$

donde L_c es la longitud característica de la esfera (la relación entre el volumen y el área de la esfera), k_{cu} es la conductividad de la esferas y D es el diámetro de la esfera. Por otro lado, y para fines de comparación, la literatura publicada muestra que el coeficiente promedio de convección natural para el enfriamiento de la esfera también puede determinarse por medio de análisis dimensional, con la ecuación (Incropera, 1999):

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu} * K_{aire}}{L_C} \tag{5}$$

donde k_{aire} es la conductividad térmica del aire a la temperatura de película, L_c es la longitud característica (relación entre el volumen y el área de la esfera), y \overline{Nu} , Ra y Pr son los grupos adimensionales conocidos como el Nusselt global, el Rayleigh y el Prandtl. El Nusselt promedio y el Rayleigh que se determinan por las correlaciones empíricas (Cengel, 2007):

$$\overline{Nu} = 2 \frac{0.589 * R_a^{1/4}}{\left[1 + \left(\frac{0.469}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{4/9}} \quad (6)$$

$$Ra = Gr * Pr \quad (7)$$

donde el Prandtl se determina a partir de tablas en la literatura publicada y el Grashoff de la expresión (Incropera, 1999):

$$Gr = \frac{\beta g (T_e - T_\infty) L_c^3}{\nu^2} \quad (8)$$

donde β es el coeficiente de expansión volumétrica del aire, g la aceleración de la gravedad, T_e la temperatura de la esfera, T_∞ la temperatura del aire ambiente, L_c la longitud característica de la esfera y μ es la viscosidad cinemática.

3. RESULTADOS

3.1 Datos medidos

La tabla 1 muestra lo datos medidos para la esfera. La conductividad térmica de la esfera es la del cobre puro a la temperatura superficial promedio de la esfera durante el proceso de enfriamiento (68.7 °C= 341.8K).

La tabla 2 muestra los datos medidos de la temperatura de la esfera, temperatura ambiente y los coeficientes de convección promedio, calculados con varios instantes de tiempo durante el proceso de enfriamiento.

Tabla 2.

Cantidad	Valor
Masa	588.6 ± 0.1 g
Diámetro	49.88 ± 0.05 mm
Temperatura inicial	72.7 ± 0.1 °C
Área	0.002449 ± 0.000016 m ²
Volumen	0.00006497 ± 0.0000002 m ³
Densidad	9061 ± 56 kg/m ³
Conductividad térmica (a T _{prom.} de esfera)	397.66 W/mK
Calor específico (a T _{prom.} de esfera)	387.3 J/kgK

3.2 Determinación del coeficiente de convección global

3.2.1. Correlaciones empíricas de la literatura publicada

La tabla 3 muestra las propiedades del aire a la temperatura de película $T_{film} = 43.9^\circ\text{C}$ y a una presión atmosférica de 560 mm de Hg, co-

respondiente a la ciudad de Bogotá. También, muestra los valores para los grupos adimensionales Grashoff, Rayleigh, Nusselt promedio y del coeficiente global de convección entre la esfera y el aire, calculados a partir de las expresiones 5 a 8. El Grashoff se calculó con el valor de 68.7 °C, correspondiente a la temperatura promedio de la esfera durante el proceso de enfriamiento.

Tabla 3. Parámetros para cálculo del coeficiente de convección a partir de correlaciones de la literatura publicada

Parámetro	Valor
Coeficiente expansión volumétrica (b)	$3.15 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$
Viscosidad cinemática (u)	$2.3685 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
Conductividad térmica (k)	0.02690 W/mK
Número de Prandtl (Pr)	0.7244
Número de Grashoff (Gr)	1569.8
Número de Rayleigh (Ra)	1137.2
Número de Nusselt global (Nu)	4.645
Coeficiente global de convección	15.03

3.2.2. Promedio de los coeficientes globales obtenidos de datos experimentales

Como se observa en la tabla 2, el coeficiente global de convección promedio para el proceso de enfriamiento de la esfera es $17.4 \pm 7.5 \text{ W/m}^2\text{K}$. La incertidumbre es la desviación estándar de los datos experimentales, que muestra una dispersión estadísticamente alta de los valores. Por otro lado, el valor medio presentó un error relativo del 15.8% con respecto al valor calculado de 15.03 W/m²K a partir de la correlaciones empíricas publicadas en la literatura.

3.2.3 Regresión exponencial de los datos experimentales

La gráfica 1 muestra la variación de la temperatura de la esfera en función del tiempo. Se muestra el diagrama de dispersión de los datos experimentales, la línea de regresión exponencial, la ecuación de la regresión y el coeficiente de correlación. El valor cercano a uno del coeficiente de correlación muestra que los datos experimentales tienen un comportamiento aproximadamente exponencial.

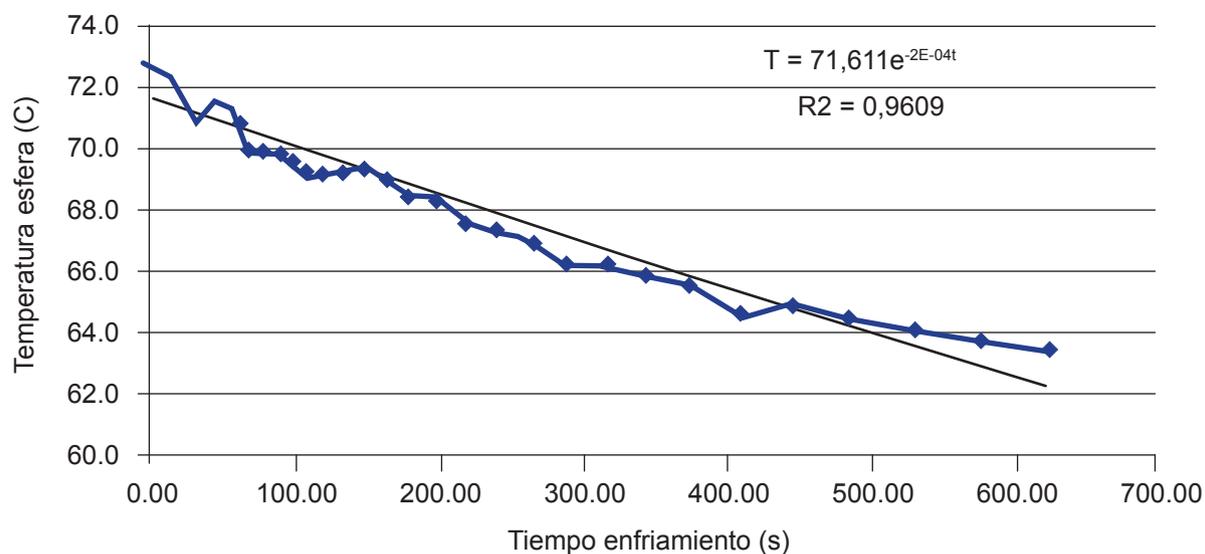
Gráfica 1. Temperatura vs. tiempo para el enfriamiento de la esfera

Tabla 2. Temperatura de la esfera y coeficiente de convección global en función del tiempo

Tiempo ($\pm 0.01s$)	Temperatura superficial esfera ($\pm 0.1\text{ }^{\circ}C$)	Temperatura promedio aire ($\pm 0.1\text{ }^{\circ}C$)	h ($\pm 0.01\text{ W/m}^2\text{K}$)
0.00	72.7	19.2	N/A
5.00	72.4	19.2	43.7
10.00	72.3	19.2	27.4
15.00	72.2	19.2	22.0
20.00	71.7	19.2	30.4
25.00	71.4	19.1	28.8
30.00	71.2	19.1	27.8
35.00	71.0	19.1	27.0
40.00	71.3	19.1	19.4
45.00	71.3	19.1	17.2
50.00	71.1	19.1	17.8
55.00	71.1	19.1	16.2
60.00	70.7	19.1	18.6
70.00	69.9	19.2	23.3
80.00	69.9	19.3	21.1
90.00	69.8	19.2	18.8
100.00	69.6	19.1	17.5
110.00	69.1	19.1	18.6
120.00	69.1	19.0	16.5
135.00	69.2	19.1	14.7
150.00	69.2	19.2	13.6
165.00	68.9	19.2	13.4
180.00	68.5	19.2	13.6
200.00	68.3	19.2	12.9
220.00	67.6	19.2	13.6
240.00	67.3	19.1	13.0
265.00	66.9	19.1	12.7
290.00	66.2	19.1	13.1
315.00	66.2	19.1	12.1
345.00	65.9	19.1	11.6
375.00	65.5	19.0	11.1
410.00	64.6	19.0	11.6
445.00	64.8	19.0	10.4
485.00	64.4	19.1	10.2
530.00	64.0	19.1	9.8
575.00	63.7	19.1	9.4
625.00	63.4	19.1	9.0
Promedio		19.1	17.4

El exponente de la ecuación de la regresión exponencial de la gráfica 1 es igual a:

$$-\frac{\bar{h}A_e}{\rho V_e C_p} = -2 \times 10^{-4}$$

donde A_e , V_e , ρ y C_p son el área, volumen, la densidad y el calor específico de la esfera.

Despejando \bar{h} y con los datos de la tabla 1 se tiene que

$$\bar{h} = \frac{(-2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}) \times (9061 \pm 56 \text{ kg/m}^3) \times (6,497 \times 10^{-5} \pm 2,000 \times 10^{-7} \text{ m}^3) \times (387,3 \text{ J/kgK})}{0.002449 \pm 0.000016 \text{ m}^2}$$

$$\bar{h} = 18.62 \pm 0.29 \text{ W/m}^2\text{K}$$

donde la incertidumbre es determinada por la expresión para la propagación de errores, dada en la referencia (UNAL, 2013). El error relativo fue de 23.9%.

La tabla 4 muestra los valores del número de Biot para los dos valores experimentales del coeficiente global de convección, hallados experimentalmente y para el calculado a partir de las correlaciones empíricas de la literatura, obtenidos a partir de la expresión (4). Se observa que para todos los casos el valor es mucho menor que 0.1.

Tabla 4. Valores del Biot para coeficientes de convección experimentales

$h(\text{W/m}^2\text{K})$	Biot	Incertidumbre
15.03	$3.14 \cdot 10^{-4}$	-
17.4	$3.64 \cdot 10^{-4}$	$9.43 \cdot 10^{-4}$
18.62	$3.86 \cdot 10^{-4}$	$5.61 \cdot 10^{-5}$

3.3. Simulación de proceso de enfriamiento

En este apartado, se mostrarán los resultados de cuatro experimentos que simulan el proceso de enfriamiento de la esfera durante 625 s, utilizando el programa de computador ALGOR, para cuatro situaciones distintas. La primera situación, corresponde a la variación temporal del coeficiente promedio de convección sobre

la superficie de la esfera, según los valores de la tabla 2; la segunda, corresponde al promedio de los coeficientes globales de todos los instantes de tiempo (17.4 W/m²K); la tercera, al coeficiente global calculado a partir del exponente de la ecuación de regresión exponencial (18.62 W/m²K, ver Gráfica 1) y, la cuarta al coeficiente global calculado a partir de las correlaciones empíricas publicadas en la literatura (15.03 W/m²K), determinados en el apartado anterior. El intervalo de 625 s se dividió en 36 pasos: 12 pasos de 5 s cada uno, 6 de 10 s, 4 de 15 s, 3 de 20 s, 3 de 25 s, 2 de 30 s, 2 de 35, 1 de 40, 2 de 45 y 1 de 50 s. Lo anterior se realizó para tener en cuenta el comportamiento exponencial de la temperatura.

A manera de ejemplo, se mostrará a continuación la simulación del proceso de enfriamiento de la esfera durante los 625 s, para la condición del coeficiente global variando con el tiempo sobre la superficie de la esfera.

En la figura 6, se muestra la interfaz de ALGOR donde se realiza el pre-procesamiento del enfriamiento de la esfera. En esta interfaz, se le suministraron al programa datos entre los que se destacan el tamaño del enmallado, el material (cobre), las condiciones de frontera (convección), el tipo de análisis (transferencia de calor en estado transitorio), el sistema de unidades (internacional) y el tipo de elemento finito que se utilizó para modelar la esfera (ladrillo o "brick").

La figura 7 muestra el campo escalar de temperaturas de la esfera al inicio del proceso de enfriamiento. Como se puede observar, la temperatura inicial que se configuró fue la de 72.7°C. Como se están despreciando los gradientes espaciales de temperatura, se asume que toda la esfera está a la temperatura anteriormente mencionada en el tiempo $t=0$.

La figura 8 muestra la gráfica de contorno del campo escalar de temperaturas finales cuando se deja que el coeficiente promedio de convección sobre la superficie de la esfera, varíe con

respecto al tiempo. La temperatura de todos los puntos de la esfera oscila entre 65.2516 y 65.2520 °C. La variación espacial de temperatura es del orden de 4×10^{-4} °C. Aunque la gráfica de contornos presenta variación en la coloración, la escala de temperaturas (parte superior derecha) muestra que el cambio de temperatura solamente se percibe en las milésimas de grado Celsius. La temperatura final del nodo de referencia fue 65.2518 °C (Gráfica 2), lo cual representa un error relativo del 2.9% con respecto a la temperatura obtenida en la parte experimental (63.4 °C).

Figura 6. Interfaz de ALGOR en fase de preprocesamiento del enfriamiento de la esfera

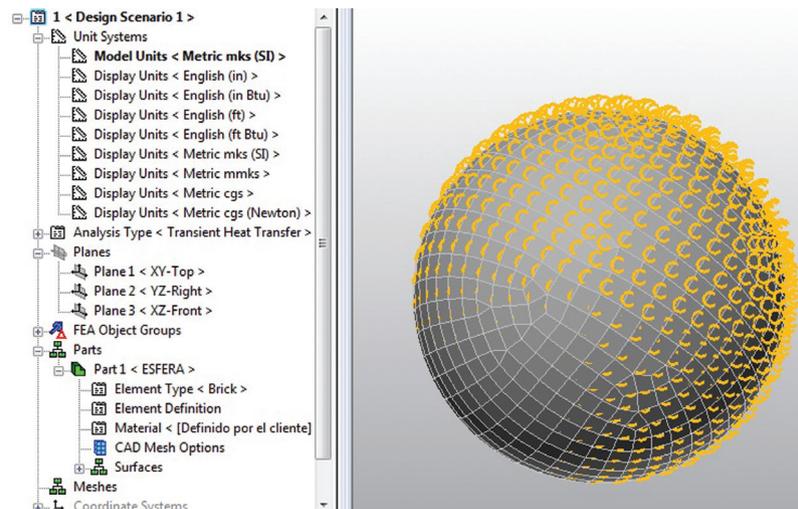


Figura 7. Campo escalar de temperaturas de la esfera en el tiempo $t = 0$

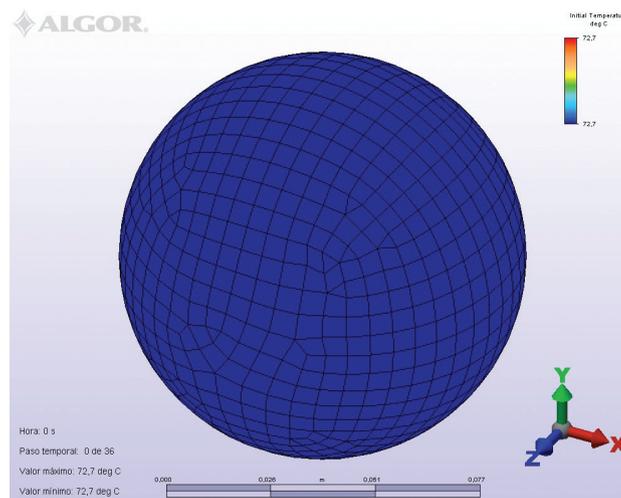
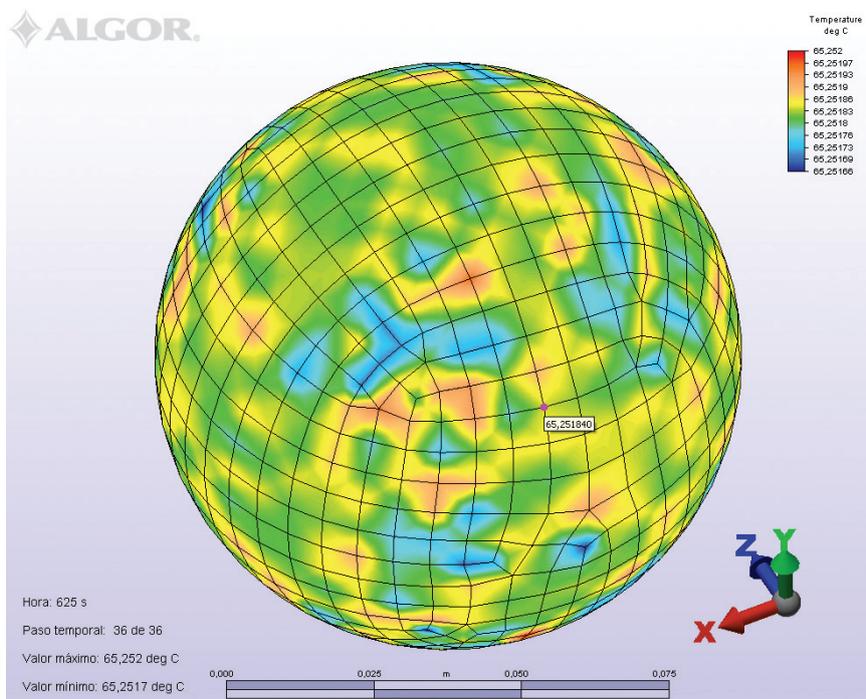


Figura 8. Campo de temperaturas finales coeficiente global variable de convección



Gráfica 2. Historia de temperaturas nodo de referencia - coeficiente global variable de convección

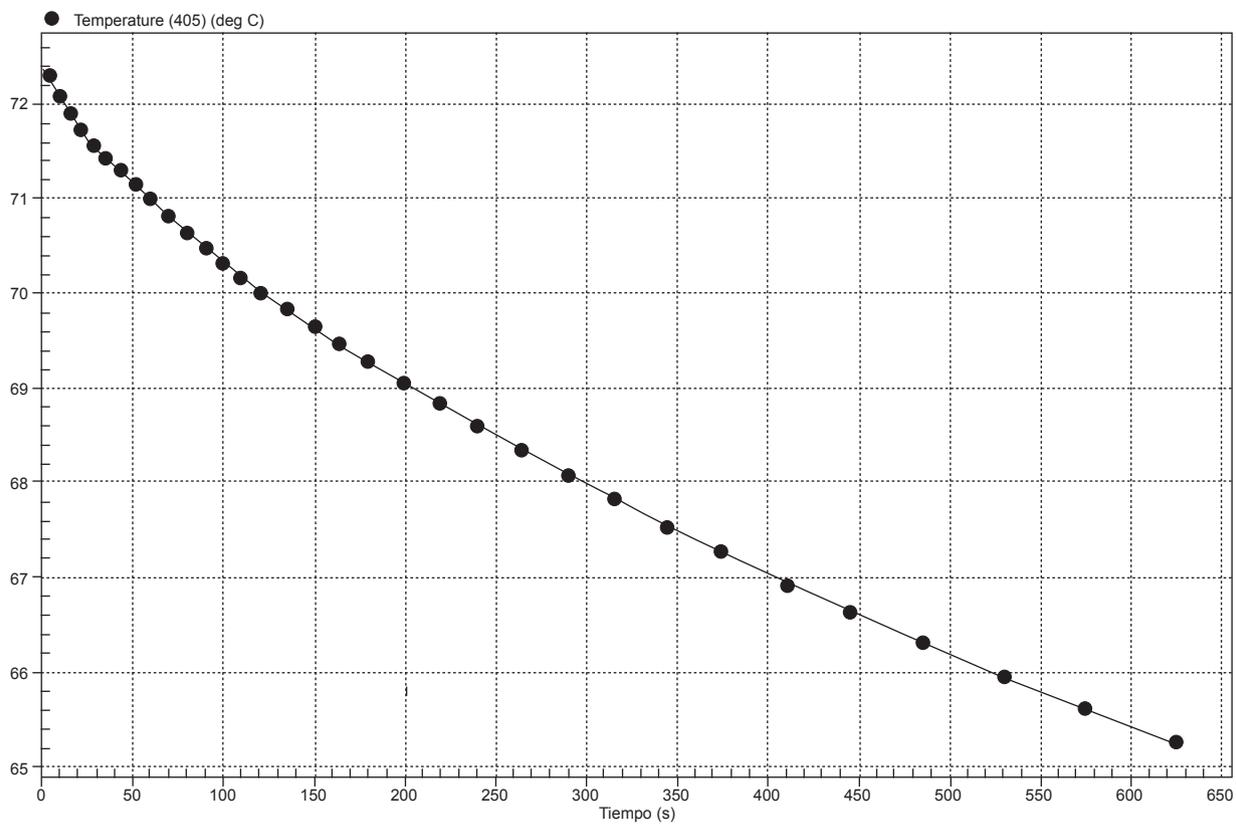


Tabla 5. Resultados simulaciones enfriamiento de esfera para 625 s.

No. Situación	Temp. Mín. (°C)	Temp. Máx. (°C)	DT (°C)	Temp. Final (°C)	Error relativo (%)
1	65.2516	65.2520	$4 \cdot 10^{-4}$	65.2518	2.9
2	63.5775	63.5780	$5 \cdot 10^{-4}$	63.5775	0.3
3	63.0022	63.0028	$4 \cdot 10^{-4}$	63.0022	0.6
4	64.7177	64.7182	$5 \cdot 10^{-4}$	64.7177	2.1

La tabla 5 compara los resultados de la simulación anterior con los de las simulaciones para para las otras tres situaciones.

La segunda y tercera columnas de la tabla 5 corresponden a la temperatura mínima y a la temperatura máxima de la esfera al término de 625 s de enfriamiento. La cuarta columna a la diferencia entre las dos temperaturas anteriores. La quinta columna corresponde a la temperatura obtenida en el mismo nodo (No. 405, también llamado de referencia), a los 625 s de enfriamiento y la sexta al error relativo con respecto a la temperatura medida experimentalmente en el mismo instante de tiempo (63.4°C)

4. DISCUSIÓN

El valor del coeficiente global de convección obtenido con el promedio de los coeficientes globales en cada instante de tiempo de medición (17.4 W/m²K con error relativo: 15.8%) es más exacto que el obtenido mediante de la regresión exponencial de los datos experimentales (18.62 W/m²K; error relativo: 23.9%), ya que el valor del primero se acerca más al valor calculado con las correlaciones empíricas de la literatura publicada (15.03 W/m²K). Sin embargo, la dispersión de los datos es más grande en el primer coeficiente (± 7.5 W/m²K) que en el segundo (± 0.29 W/m²K), lo que hace al coeficiente más preciso.

Por otro lado, las diferencias entre valores de temperatura finales máximos y mínimos en la esfera fueron 4×10^{-4} , 5×10^{-4} , 4×10^{-4} y 5×10^{-4} °C para las simulaciones con coeficiente global de convección variable en el tiempo, con co-

eficiente global constante como promedio de datos experimentales, con coeficiente global constante como regresión exponencial de los datos experimentales y con coeficiente global a partir de las correlaciones empíricas de la literatura, respectivamente. Como se puede notar, se presentan pequeñas diferencias entre los valores finales máximos y mínimos (del orden de la diezmilésima de grado Celsius) mostrados en cada uno de los gráficos de contorno del campo de temperaturas.

Respecto a la temperatura final del nodo de referencia, los errores relativos fueron 2.9%, 0.3%, 0.6% y 2.1% para las simulaciones con coeficiente global de convección variable en el tiempo, con coeficiente global constante como promedio de datos experimentales, con coeficiente global constante como regresión exponencial de los datos experimentales y con coeficiente global a partir de las correlaciones empíricas de la literatura, respectivamente. Como se observa, los cuatro errores relativos son menores al 5% respecto a la temperatura medida en el experimento físico.

CONCLUSIONES

En este estudio se determinó el coeficiente global de convección natural para simular el proceso de enfriamiento de una esfera. Las conclusiones que se infirieron a partir de los resultados son

Los valores del número de Biot, correspondientes a los coeficientes de convección hallados mediante el promedio de los valores

experimentales, de la regresión exponencial de éstos y a través de las correlaciones empíricas de la literatura, son menores a 0.1 y, por lo tanto, permiten afirmar que la suposición de despreciar los gradientes espaciales de temperatura fue válida y que la temperatura del nodo de referencia puede considerarse como representativa de la temperatura de toda la esfera.

Los valores experimentales del coeficiente de convección entre la superficie de la esfera y el aire ambiente son coherentes con la literatura publicada. Los valores correspondientes al promedio de los datos y a la regresión exponencial fueron $17.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ y $18.62 \text{ W/m}^2\text{K}$,

respectivamente. Estos valores están dentro del rango de 2 a $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Cengel, 2007) que los autores sugieren para flujos de gases en convección natural.

El valor experimental del coeficiente de convección que simula de manera más real el proceso de enfriamiento de la esfera es el obtenido mediante de la regresión exponencial de los datos ($18.62 \text{ W/m}^2\text{K}$) ya que, a pesar de su mayor error relativo, su incertidumbre es menor y las temperaturas resultantes son más cercanas a las del experimento físico, que las obtenidas con el promedio de los coeficientes globales determinados en cada instante de medición.

BIBLIOGRAFÍA

Cengel, Y. (2007). *Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico*. México D.F.: McGrawHill.

Chen, T.S y Mucoglu, A. (1977). Analysis of mixed forced and free convection about a sphere. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 20(8), 867-875.

Departamento de física Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. (2013). Análisis de incertidumbres para una buena experimentación. Recuperado el 23 de enero de 2013 de [\[ca.webcindario.com/archivos_lecturas/TeoriaErrores.pdf\]\(http://ca.webcindario.com/archivos_lecturas/TeoriaErrores.pdf\)](http://elise-</p>
</div>
<div data-bbox=)

Douglas K. y Johnson, A. (1986) Experimental determination of mixed convective heat transfer from a sphere to air. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 13(4), 369-387.

Incropera, F. y De Witt, D. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. México D.F.: Prentice Hall.

Rojas, J. (2009). Determinación experimental del coeficiente de transferencia de calor convectivo en la superficie de una esfera de cobre.

Revista Electrónica, 11(1), 33-43. Recuperado el 23 de enero de 2013 de http://www.tec.url.edu.gt/boletin/URL_11_MEC01.pdf

Spalding, D. y Pun, W. (1961). A review of methods for predicting heat transfer coefficients for laminar uniform – property boundary layer flows. *International Journal of Heat Transfer*, 5(1), 239-249.

Yang, S. (2007). Numerical study of transient laminar natural convection over an isothermal sphere. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 28(1), 821-837.