

**Estimación de
coeficientes de
transmisión de calor de
convección y radiación**

Objetivos de la práctica

- Analizar un sistema de transmisión de calor relativamente complejo, caracterizando sus resistencias controlantes.
- Diseñar una técnica experimental para reducir convenientemente una resistencia a la transmisión de calor.
- Determinar coeficientes de transmisión de calor individuales (de convección y radiación) a partir de un coeficiente global.

Fundamento teórico

El calor es una forma de energía en tránsito, debida a una diferencia de temperaturas. El intercambio de energía interna entre dos sistemas a causa de sus temperaturas constituye el llamado “flujo de calor”. El estudio de las circunstancias que lo rigen toma el nombre de “transmisión de calor” aunque, rigurosamente, la energía que se trasmite es energía interna y sólo en tránsito se la denomina “calor”.

Habitualmente se distinguen tres mecanismos de transmisión de calor:

- **Conducción:** Mecanismo por el que la energía se transporta a través de una sustancia (sólido) sin movimiento de ésta (sin transporte másico).
- **Convección:** Mecanismo por el que la energía se transporta a través de una sustancia (fluido), debido al movimiento de ésta (con transporte másico); si el movimiento del fluido se debe únicamente a diferencias de densidades, la convección se denomina “natural”, mientras que si el movimiento se produce por fuerzas externas, la convección se denomina “forzada”.
- **Radiación:** Mecanismo por el que la energía se transporta en forma de radiación electromagnética (sin necesidad de un medio material) emitida por cualquier sustancia que se encuentra a una temperatura mayor a la del cero absoluto.

Las ecuaciones que describen la densidad de flujo de calor para cada uno de los mecanismos indicados se muestran en la siguiente tabla, donde asimismo se expresan las ecuaciones en la forma de símil eléctrico (ley de Ohm).

Mecanismo	Ecuación	$q \left[\frac{W}{m^2} \right] = \frac{Q}{A} =$	$\frac{[fuerza impulsora]}{[resistencia]}$
Conducción	Ley de Fourier	$- k \frac{\Delta T}{\Delta x} = - \frac{k}{e} \Delta T$	$-\frac{\Delta T}{\frac{e}{k}}$
Convección	Ecuación empírica	$- h_c \Delta T$	$-\frac{\Delta T}{\frac{1}{h_c}}$
Radiación	Ley de Stephan-Boltzmann (cuerpo negro)	$- \sigma T^4$	X
	Práctica ingenieril	$- h_R \Delta T$	$-\frac{\Delta T}{\frac{1}{h_R}}$

El parámetro **k** es la denominada “**conductividad térmica**”, coeficiente de proporcionalidad cuyo valor depende del tipo de material y de su estado físico. Los parámetros **h_c** y **h_R** son los llamados “**coeficientes individuales de transmisión de calor** de convección y radiación”, respectivamente; también expresan la proporcionalidad entre la densidad de flujo de calor y el gradiente de temperatura, pero dependen de diferentes características del fluido.

Cuando coexisten dos o más mecanismos de transmisión de calor en un sistema, puede utilizarse una ecuación análoga a las anteriores para expresar la densidad de flujo de calor global:

$$q = \frac{Q}{A} \left[\frac{W}{m^2} \right] = - U \Delta T = - \frac{\Delta T}{\frac{1}{U}}$$

donde **U** es el denominado “**coeficiente global de transmisión de calor**”. Si la transmisión de calor se produce en sistemas con geometrías en las que puede ir variando el área de paso del calor (cilíndrica o esférica), suele ser preferible expresar la ecuación anterior en forma de flujo:

$$Q [W] = - U A_i \Delta T = - \frac{\Delta T}{\frac{1}{U A_i}}$$

con objeto de poder estudiar cada una de las superficies **A_i** por separado.

La coexistencia de mecanismos implica que puedan darse de forma secuencial o simultánea. En estos casos, la mejor forma de abordar el estudio del problema es mediante el análisis de cada una de las resistencias que se oponen a la transmisión

de calor. También en este caso es válido el símil eléctrico para calcular la resistencia global (R_U) en función de las resistencias individuales:

Combinación de resistencias	Resistencias en SERIE	$R_U = \sum R_i$
	Resistencias en PARALELO	$\frac{1}{R_U} = \sum \frac{1}{R_i}$

Se considerará un sistema formado por un tubo de vidrio vertical, en cuyo interior se produce la condensación de vapor de agua debido a que pierde calor a través de la pared hacia el ambiente circundante, que se encuentra a una temperatura muy inferior.

El calor perdido a través del tubo puede expresarse mediante la ecuación:

$$Q [W] = U A_e (T_v - T_a) \quad [1]$$

que permite obtener el flujo de calor a través de la superficie externa del tubo, A_e , debido a la diferencia de temperaturas entre el valor condensante, T_v y el aire circundante, T_a , si se conociese el coeficiente global de transmisión de calor, U .

Por el contrario, si se desea conocer U , habrá que determinar el flujo de calor Q , que para el caso de un vapor condensante puede expresarse como:

$$Q [W] = M \lambda_v = \frac{m}{t} \lambda_v \quad [2]$$

siendo M el caudal másico de condensación (kg/s) y λ_v el calor latente de vaporización a temperatura constante (2.257 kJ/kg para el agua) y m la masa de líquido condensado durante un tiempo t .

La combinación de las dos ecuaciones anteriores para un tubo cilíndrico de longitud L y diámetro externo D_e permite poner, finalmente:

$$U \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right] = \frac{\frac{m}{t} \lambda_v}{\pi D_e L (T_v - T_a)} \quad [3]$$

Ahora bien, un análisis detallado de este proceso de transmisión de calor muestra que al valor del coeficiente global U contribuyen varias resistencias:

- La película líquida de vapor condensante opone resistencia al paso del calor (convección): R_{VC}
- El tubo de vidrio opone resistencia al paso del calor (conducción): R_{TV}
- El aire circundante opone resistencia al paso del calor (convección en el aire y radiación procedente del tubo caliente, simultáneamente): R_{C+R}

También puede deducirse que:

- R_{VC} , R_{TV} y R_{C+R} están en serie
- R_{C+R} es la composición de dos resistencias en paralelo

Por lo tanto, la resistencia total, R_T puede expresarse de la forma:

$$R_T = R_{VC} + R_{TV} + R_{R+C} \quad [4]$$

Además, un estudio bibliográfico de los órdenes de magnitud de estas resistencias permite obtener los siguientes resultados:

R_{VC}	R_{TV}	R_C	R_R
$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$	10^{-1}	10^{-1}

Estos valores indican que se pueden considerar despreciables R_{VC} y R_{TV} frente a R_C y R_R , por tanto:

$$R_T = R_{R+C} \quad [5]$$

Como ambas resistencias están en paralelo:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_R} \quad [6]$$

Y como las resistencias están definidas como los inversos de los coeficientes:

$$U = h_C + h_R \quad [7]$$

Esta ecuación indica que, aunque U puede obtenerse a partir de datos experimentales, los coeficientes h_C y h_R siguen siendo incógnitas, que se desea determinar, por lo que es necesario buscar otra ecuación que permita la resolución del sistema.

La obtención de la segunda ecuación necesaria está basada en la modificación

del dispositivo experimental. En efecto, si se cubre el tubo de vidrio con una lámina de aluminio, puede despreciarse la resistencia debida a la radiación, ya que la emisividad del aluminio es una 20 veces menor que la del vidrio. Aunque se introduce una resistencia en serie adicional (conducción), también puede considerarse despreciable (si ya lo era la del vidrio, el aluminio es mucho más conductor).

Por tanto, al haber eliminado prácticamente la radiación, un experimento con el tubo cubierto permitirá obtener un nuevo valor del coeficiente global, que debe coincidir aproximadamente con el coeficiente individual de convección:

$$U' \approx h_c \quad [8]$$

Conocido el coeficiente individual de convección, el cálculo del coeficiente de radiación sería inmediato:

$$h_R = U - U' \quad [9]$$

lo que resolvería el problema de calcular los coeficientes individuales a partir de la obtención experimental de los coeficientes globales.

Cálculo teórico de coeficientes individuales

Con objeto de agilizar los cálculos en el diseño de aparatos, muchas veces se utilizan ecuaciones empíricas para calcular los coeficientes individuales a partir de parámetros conocidos del sistema. Así, para la estimación del coeficiente individual debido a la convección natural en tubos verticales, puede utilizarse la ecuación dimensional:

$$h_c \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right] = 1,31 \left(\frac{\Delta T}{D} \right)^{0,25} \quad [10]$$

donde:

D: Diámetro externo del tubo [m]

Diferencia de temperaturas [K]

Por otra parte, puede obtenerse una ecuación de estimación del coeficiente individual de radiación comparando la ecuación de Stephan-Boltzman para el cuerpo gris:

$$Q [W] = \sigma \epsilon A (T_s^4 - T_a^4) \quad [11]$$

donde:

σ : Constante de Stephan-Boltzman, $5,57 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

ϵ : Emisividad del material radiante [-]

con la ecuación de definición del coeficiente individual de radiación:

$$Q [W] = h_R A (T_s - T_a) \quad [12]$$

Igualando ambas expresiones se obtendrá:

$$h_R \left[\frac{W}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right] = \sigma \epsilon \frac{T_s^4 - T_a^4}{T_s - T_a} \quad [13]$$

Dispositivo experimental

El dispositivo experimental está compuesto del tubo de vidrio objeto del estudio y de una instalación adicional que permite producir vapor de agua y mantener el estado estacionario a lo largo de toda la experimentación.

El vapor se produce en un calderín mediante una resistencia eléctrica de inmersión, cuya potencia se fija con un reostato. El vapor generado en exceso, sube a través del tubo de vidrio, donde una fracción del mismo condensa sobre las paredes y el sobrante se recircula al sistema, que opera en circuito cerrado y a presión atmosférica, con ayuda de un condensador. En la base del tubo se ha instalado una trampa de reflujo, donde se recoge el vapor condensado que se ha deslizado por las paredes del tubo. Según la posición de la llave de la trampa de reflujo, se puede hacer que el agua recogida recircule, se acumule (llave cerrada) o se extraiga como muestra para determinar su cantidad.

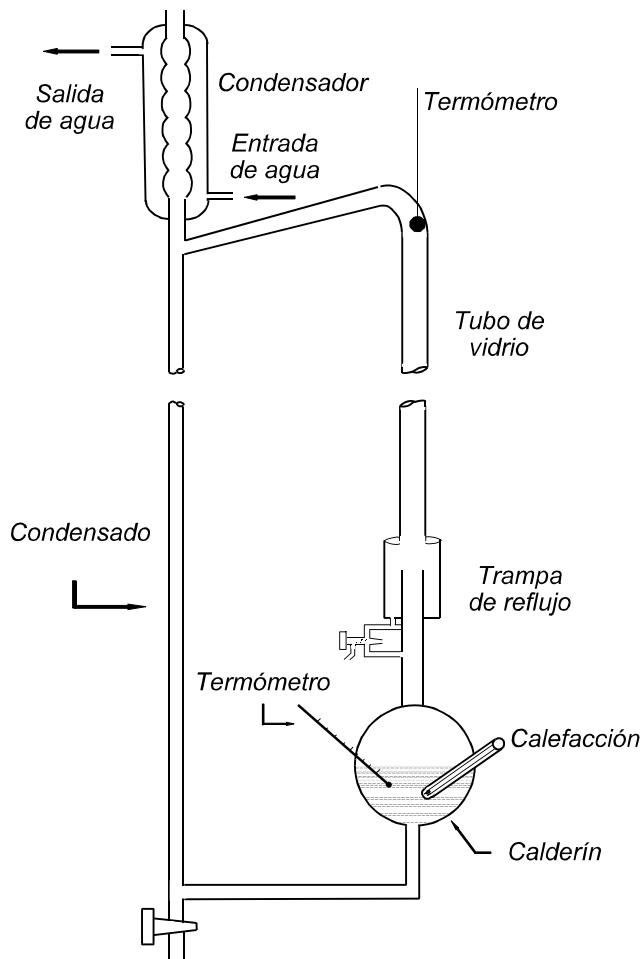


Figura 1

Realización práctica

Encender el reostato, fijando su potencia de operación en el 70% (para asegurar la producción de vapor en exceso) y conectar el agua de refrigeración del condensador. Esperar el tiempo necesario para lograr el estado estacionario, que puede confirmarse mediante las medidas de temperatura de los dos termómetros internos del sistema. Durante este tiempo, la llave de la trampa de reflujo debe estar en posición de recirculación.

Cuando se desea efectuar una medida del caudal de condensado, se cierra la llave de la trampa de reflujo y se comienza a medir el tiempo, con ayuda de un cronómetro. Cuando la trampa se haya llenado (después de unos 8 - 10 minutos), se gira la válvula hacia la posición de salida, se recoge el agua en un matraz, previamente pesado, y se detiene la medida del tiempo. Una nueva pesada del matraz con el agua

recogida permitirá determinar la masa de agua y junto con la medida del tiempo, el caudal másico de condensado.

La medida se repetirá varias veces, con objeto de disponer de un valor medio del caudal de condensado, que permita calcular con mayor precisión el valor del flujo de calor.

También será necesario medir las temperaturas del vapor y del ambiente, la longitud del tubo (con una cinta métrica) y su diámetro externo (con un calibrador).

Una vez efectuadas las medidas, se apaga el reostato, se espera a que deje de producirse vapor y se desconecta el agua de refrigeración.

Obsérvese que el procedimiento descrito debe realizarse tanto con el tubo desnudo como con el tubo cubierto. Por razones prácticas, es aconsejable cubrir el tubo antes de iniciar la experimentación y, una vez obtenidas las medidas correspondientes, retirar cuidadosamente la lámina de aluminio, esperar el tiempo necesario para que se alcance el nuevo estado estacionario y efectuar las medidas correspondientes al tubo desnudo.

Presentación de los resultados

1. Calcular el caudal másico medio de vapor condensado para el tubo cubierto.
2. Obtener el caudal de calor para el tubo cubierto. Con ayuda de las temperaturas medidas y de los parámetros geométricos del tubo, calcular el coeficiente global de transmisión de calor. ¿Con qué coeficiente individual coincide este valor?
3. Calcular el caudal másico medio de vapor condensado para el tubo desnudo.
4. Obtener el caudal de calor para el tubo desnudo. Con ayuda de las temperaturas medidas y de los parámetros geométricos del tubo, calcular el coeficiente global de transmisión de calor.
5. Calcular el otro coeficiente individual.
6. ¿Son ambos coeficientes individuales del mismo orden de magnitud?
7. Teniendo en cuenta que la emisividad del vidrio es $\epsilon = 0,937$, obtener los coeficientes individuales de convección y radiación mediante las respectivas ecuaciones [10] y [13], comparando los resultados con los obtenidos experimentalmente.
8. Si se utilizase etanol para realizar el experimento en vez de agua, ¿qué

resultados podrían esperarse?

Bibliografía

- Costa, E. y otros; "Ingeniería Química I. Conceptos generales", Ed. Alhambra, Madrid (1983).
- Costa, E. y otros; "Ingeniería Química IV. Transmisión de calor", Ed. Alhambra, Madrid (1985).
- Costa, J. y otros; "Curso de Química Técnica", Ed. Reverté, Barcelona (1988)