

Fenómenos de Transporte 2

Ejercicios Enero – Junio 2017

EJERCICIO 0 – REPASO DE ECUACIONES DIFERENCIALES (OPCIONAL)

En cada caso, resolver la ecuación diferencial. Cuando se proporcione condiciones de frontera, emplearlas para obtener la solución particular.

RESPUESTAS:

- | | |
|---|---|
| 1. $\frac{dy}{dx} = e^{3x+2y}$ | $-3e^{-2y} = 2e^{3x} + C$ |
| 2. $(4y + yx^2)dy - (2x + xy^2)dx = 0$ | $2 + y^2 = C(4 + x^2)$ |
| 3. $x\frac{dy}{dx} + 2y = 3$ | $y = \frac{3}{2} - \frac{C}{2x^2}$ |
| 4. $\frac{dy}{dx} + e^{-3x} = 0$ | $y = \frac{1}{3}e^{-3x} + C$ |
| 5. $\frac{dy}{dx} + y = e^{3x}$ sujeta a $y(0) = 1$ | $y = \frac{1}{4}e^{3x} + \frac{3}{4}e^{-x}$ |
| 6. $2\frac{d^2y}{dx^2} + 5\frac{dy}{dx} = 0$ | $y = C_1 + C_2e^{-\frac{5}{2}x}$ |
| 7. $\frac{d^2y}{dx^2} + 9y = 0$ | $y = C_1 \sin(3x) + C_2 \cos(3x)$ |
| 8. $\frac{d^2y}{dx^2} - 10\frac{dy}{dx} + 25y = 0$ | $y = C_1e^{5x} + C_2xe^{5x}$ |
| 9. $\frac{d^2y}{dx^2} - 4\frac{dy}{dx} + 5y = 0$ | $y = C_1e^{2x} \sin x + C_2e^{2x} \cos x$ |

EJERCICIO 1

Estimar la conductividad térmica del nitrógeno gaseoso a 135 °C. A esta temperatura, la capacidad calorífica a presión constante del nitrógeno es 29.3 J/mol·K y su viscosidad en fase gas es 2.23×10^{-5} Pa·s.

RESPUESTA: 0.0335 W/m·K

EJERCICIO 2 – OPCIONAL

Estimar la conductividad térmica del monóxido de carbono gaseoso a 377 °C y 1 atm. La capacidad calorífica a presión constante del CO como gas ideal es $c_p = 35.524 - 0.0325T + 9.827 \times 10^{-5}T^2 - 1.082 \times 10^{-7}T^3 + 4.282 \times 10^{-11}T^4$ (T en K, c_p en J/mol·K).

RESPUESTA: 0.0476 W/m·K

EJERCICIO 3

Estimar la conductividad térmica del argón a 110 °C y 147 atm.

RESPUESTA: 0.0268 W/m·K

EJERCICIO 4

Sabiendo que la conductividad térmica de la acetona a 353 K y 1 bar es 0.0157 W/m·K (Reid, 2000), estimar la conductividad térmica de la acetona a 500 °C y 100 atm.

RESPUESTA: 0.0535 W/m·K

EJERCICIO 5

Estimar la conductividad térmica del etanol ($T_b = 78.65$ °C) como líquido a 15 °C, empleando (A) el método de Sato y Riedel, y (B) el método de Latini. Calcular el error porcentual en ambos casos, sabiendo que a esa temperatura el valor experimental reportado es $k = 0.174$ W/m·K (Perry, 2004).

RESPUESTA: (A) 0.194 W/m·K, (B) 0.161 W/m·K

EJERCICIO 6 – OPCIONAL

Estimar la conductividad térmica de una mezcla de 20% metanol, 50% etanol y 30% éter dietílico (porcentaje molar) a 20°C. A esa temperatura, la conductividad térmica de los fluidos puros (Perry, Manual del Ingeniero Químico) es 0.203, 0.173, y 0.134 W/m·K, respectivamente.

RESPUESTA: 0.1577 W/m·K

EJERCICIO 7

Genuino salmón de Alaska se va a conservar congelado a -40 °C para su eventual consumo en finos restaurantes en todo el mundo. La composición (en base peso) del salmón es 75.62% agua, 19.76% proteína, 3.41% grasa y 1.21% cenizas, y su temperatura de congelamiento inicial es -2.2 °C. Calcular la fracción peso de hielo y la conductividad térmica (empleando el modelo paralelo) del salmón cuando se congela a -40 °C.

RESPUESTA: 69.9% hielo, 2.04 W/m·K

EJERCICIO 8

En un experimento de transferencia de calor por radiación, se disponen dos rectángulos (que pueden asumirse cuerpos negros) de 9 cm × 18 cm, colocados uno frente al otro paralelamente a una distancia de 5 cm, y se mantienen a temperaturas constantes de 25 °C y 50 °C, respectivamente. (A) Calcule la densidad de flujo de calor emitida como radiación por cada rectángulo, de acuerdo a la ley de Stefan-Boltzmann. (B) Determine el flujo neto de calor entre los dos rectángulos.

RESPUESTA: (A) 448.05 W/m² y 618.3 W/m², (B) 1.29 W.

EJERCICIO 9

En realidad, me gusta mucho mi oficina. Tiene un gran ventanal desde el que tengo muy buena vista al jardín. El único problema es que, en verano, el sol calienta el piso de concreto que está enfrente, y se siente el calor irradiado hacia la ventana. Asumiendo que en un día soleado el suelo alcanza una temperatura de 55 °C, y la ventana está a 25 °C, estimar la cantidad neta de calor transferido del suelo a la ventana de mi oficina si (A) ambas superficies se asumen cuerpos negros, y (B) si la emisividad del concreto del suelo es 0.88 y la emisividad de la ventana es 0.91.



RESPUESTA: (A) 796 W, (B) 754 W

EJERCICIO 10

Considérese un cilindro hueco de radio interior R_1 y radio exterior R_2 y longitud L . Las superficies interna y externa del cilindro se mantienen a temperaturas constantes T_1 y T_2 , respectivamente, y los extremos del cilindro se mantienen aislados. Plantear el balance de energía en una envoltura cilíndrica de espesor Δr y longitud L , y resolver la ecuación diferencial resultante para obtener el perfil de temperaturas $T(r)$ en estado estable, para $R_1 \leq r \leq R_2$.

$$\text{RESPUESTA: } T(r) = T_1 + (T_2 - T_1) \frac{\ln(r/R_1)}{\ln(R_2/R_1)}$$

EJERCICIO 11 – OPCIONAL

Repetir el ejercicio anterior para el caso de una esfera hueca de radio interior R_1 y radio exterior R_2 , cuyas superficies interna y externa se mantienen a temperaturas constantes T_1 y T_2 , partiendo del balance de energía en una envoltura esférica de espesor Δr para obtener el perfil de temperaturas $T(r)$ en estado estable, para $R_1 \leq r \leq R_2$.

$$\text{RESPUESTA: } T(r) = T_1 + (T_2 - T_1) \frac{R_2(r - R_1)}{r(R_2 - R_1)}$$

EJERCICIO 12

Adaptado de Bird (2002)

En cierto tipo de reactores nucleares, se emplea esferas de combustible nuclear formadas por un material fisionable (uranio por ejemplo) disperso en un material moderador de neutrones (grafito por ejemplo). El calor generado por la desintegración radioactiva se emplea para producir vapor de agua, que se usa para accionar un generador eléctrico.

- (A) Mediante simplificación de la ecuación de conservación de la energía térmica, determinar el perfil de temperatura en una esfera de combustible nuclear de radio R y conductividad térmica k , cuya superficie se mantiene a una temperatura constante y uniforme T_s , para el caso de una rapidez de generación de calor no uniforme dada por:

$$\dot{G} = G_0 \left[1 + b \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (G_0 \text{ y } b \text{ constantes})$$

- (B) Calcular la máxima temperatura en el interior de la esfera, si $R = 1.35$ plg, $k = 2.5$ W/m·K, $G_0 = 3.6 \times 10^6$ W/m³, $b = 0.5$ y $T_s = 150$ °C.

$$\text{RESPUESTA: } T = T_s + \frac{G_0 R^2}{6k} \left\{ \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] + \frac{3}{10} b \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^4 \right] \right\}, 474.5 \text{ °C}$$

EJERCICIO 13

Adaptado de Bird (1960)

Considérese un fluido en el espacio anular entre dos cilindros concéntricos. El cilindro interno está fijo y el cilindro externo se mueve con una velocidad angular Ω . Si el espacio entre los cilindros es suficientemente pequeño, se puede despreciar la curvatura y analizarse en un sistema de coordenadas rectangulares. En este caso, el perfil de velocidades es de la forma $v_z = \frac{x}{b} v_b$, donde b es la separación entre los cilindros y $v_b = \Omega R$ es la velocidad tangencial del cilindro externo. Si la velocidad de rotación es suficientemente alta, el fluido se calentará por disipación viscosa. Obtener el perfil de temperatura en este caso, si la superficie en $x=0$ está a una temperatura T_0 y la superficie en $x=b$ está a una temperatura T_b .

$$\text{RESPUESTA: } \frac{T - T_0}{T_b - T_0} = \frac{x}{b} \left[1 + \frac{\mu v_b^2}{2k(T_b - T_0)} \left(1 - \frac{x}{b} \right) \right]$$

EJERCICIO 14

La pared de una mufla mide 30×20 cm y está formada, de adentro hacia fuera, por una capa de 3.5 cm de ladrillo refractario de caolín ($k = 0.26 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), 4 cm de fibra de vidrio ($k = 0.081 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) y una lámina de 2.5 mm de espesor de aluminio ($k = 273 \text{ W/m}\cdot\text{K}$). Determinar la resistencia térmica total y el flujo de calor a través de la pared cuando la mufla opera a 800 °C y la superficie externa de la lámina de aluminio se encuentra a 25 °C.

RESPUESTA: 74 W

EJERCICIO 15

Se va a suministrar vapor a 130 °C a un equipo, empleando una tubería de 2 m de longitud y ½ plg de diámetro externo. ¿Con qué rapidez perderá calor la tubería si no se aísla? ¿Cuál es el radio crítico de aislamiento si se va a emplear un aislante con conductividad térmica de 0.065 W/m·K? ¿Cuánto calor perderá la tubería si el espesor del aislamiento es 5 mm? En todos los casos, despreciar la resistencia por conducción en la pared de la tubería, y usar un coeficiente de transferencia de calor por convección de 5 W/m²·K y temperatura ambiente de 25 °C.

RESPUESTA: 41.9 W, 13 mm, 61.4 W

EJERCICIO 16



Considérese un dispositivo de enfriamiento que consiste en un arreglo cuadrado de 16 aletas cilíndricas de cobre (1.9 mm de diámetro, 10.4 mm de longitud). La temperatura de la base es 55 °C, la del aire circundante es 25 °C, y el coeficiente de transferencia de calor por convección es 950 W/m²·K. Determinése la eficiencia de las aletas, cuánto calor disipa cada una, y cuánto calor en total disipa el dispositivo. La conductividad térmica del cobre es 401 W/m·K.

RESPUESTA: $\eta = 0.85$; $Q_{\text{ideal}} = 1.765 \text{ W}$, $Q = 1.5 \text{ W}$, $Q_{\text{total}} = 24 \text{ W}$

EJERCICIO 17

Se desea utilizar aletas de enfriamiento circulares de espesor constante para disipar calor de un tubo de 2 plg de diámetro externo cuya superficie se encuentra a 125 °C. Las aletas están hechas de bronce ($k = 109 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), tienen un diámetro externo de 3.5 plg y un espesor de 1/16 plg. El aire circundante se encuentra a 20 °C. Asumir $h = 560 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ constante. Determinar cuántas aletas de enfriamiento se requieren para disipar 20 kW de calor por cada metro de longitud del tubo.

RESPUESTA: Se requieren 79 aletas por cada metro de longitud del tubo

EJERCICIO 18 - OPCIONAL

Considérese un objeto sólido, con masa m_s , capacidad calorífica c_{ps} y temperatura inicial T_0 que se introduce en un recipiente que contiene un fluido con masa m_f , capacidad calorífica c_{pf} y temperatura inicial T_{f0} . El recipiente está aislado, por lo que no hay pérdidas de calor al medio ambiente. El área del objeto es A , y el coeficiente de transferencia de calor entre el objeto y el fluido es h . Se desea encontrar una ecuación que describa la temperatura T del objeto en función del tiempo. La masa del fluido no se puede asumir infinita, por lo que debe tomarse en cuenta también el cambio de la temperatura del fluido T_f con respecto al tiempo.

$$\text{RESPUESTA: } T = \frac{m_s c_{ps} T_0 + m_f c_{pf} T_{f0}}{m_s c_{ps} + m_f c_{pf}} + \left(\frac{m_f c_{pf} (T_0 - T_{f0})}{m_s c_{ps} + m_f c_{pf}} \right) \exp \left[\frac{-hA (m_s c_{ps} + m_f c_{pf})}{m_s c_{ps} m_f c_{pf}} t \right]$$

Sugerencia: Los balances de energía para el sólido y el fluido dan lugar a las siguientes ecuaciones diferenciales:

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{hA}{m_s c_{ps}} (T - T_f) \quad (1) \quad \frac{dT_f}{dt} = \frac{hA}{m_f c_{pf}} (T - T_f) \quad (2)$$

que es un sistema de dos ecuaciones diferenciales simultáneas de primer orden. Si se divide la ecuación (2) entre la ecuación (1), se obtiene una ecuación de primer orden donde no aparece el tiempo de forma explícita (un sistema de este tipo se denomina *autónomo*), de cuya solución se obtiene una ecuación que relaciona T_f con T , que puede luego sustituirse en la ecuación (1) para encontrar la solución buscada.

EJERCICIO 19

Para realizar pruebas de transferencia de calor, se emplea una esfera de 3 plg de diámetro hecha de un material no metálico ($k = 4 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), equipada con un sensor de temperatura en su centro, y un baño de aceite con agitación, ajustado para mantener una temperatura constante de $200 \text{ }^\circ\text{C}$.

(A) En el primer experimento, la esfera (inicialmente a una temperatura uniforme de $20 \text{ }^\circ\text{C}$) se sumerge en el aceite caliente. El aceite se está agitando vigorosamente, lo que hace que el coeficiente de transferencia de calor por convección entre el líquido y la esfera sea muy alto. Después de 5 minutos en el aceite, el sensor marca una temperatura de $189 \text{ }^\circ\text{C}$. ¿Cuál es la difusividad térmica del material de la esfera?

(B) En el segundo experimento, se desea medir el coeficiente de transferencia de calor por convección natural, por lo que se apaga el agitador del baño de aceite. La temperatura inicial de la esfera es $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Después de 90 s en el aceite, el sensor de la esfera registra $29 \text{ }^\circ\text{C}$. ¿Cuál es el valor del coeficiente de transferencia de calor en este caso?

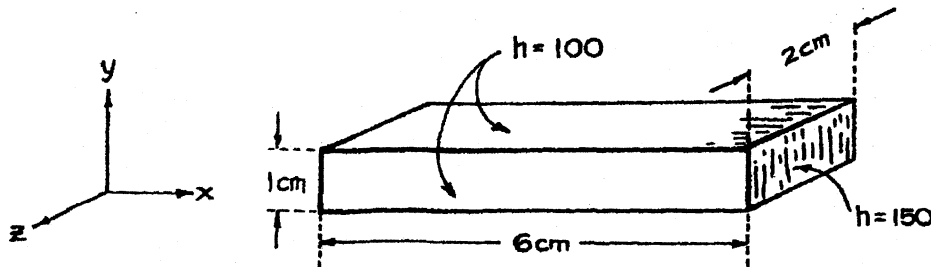
RESPUESTA: $1.72 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $94.5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

EJERCICIO 20

Adapted from Levenspiel, "Engineering Flow and Heat Exchange", Plenum Press.

A cod fillet, about $6 \times 1 \times 2 \text{ cm}$, is taken from a cooler at $0 \text{ }^\circ\text{C}$ and slipped into hot oil at $180 \text{ }^\circ\text{C}$.

- (A) What is the centerpoint temperature of the fillet after 5 minutes?
- (B) How much heat has been taken up by the fillet during this time?



For cod:

$$k = 0.5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$$

$$\alpha = 1.7 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\rho = 1050 \text{ kg/m}^3$$

For the fillet in the deep-fat fryer:

$$h = 150 \text{ W/m}^2\cdot\text{K} \text{ for the two small faces}$$

$$h = 100 \text{ W/m}^2\cdot\text{K} \text{ for the four long faces}$$

ANSWER: (A) $149.85 \text{ }^\circ\text{C}$, (B) 5792.41 J

EJERCICIO 21 – OPCIONAL

Es mucho más sencillo fabricar cubos que fabricar esferas. Un estudiante está interesado en medir el coeficiente de transferencia de calor de un cubo sumergido en un fluido. Para este efecto, fabrica un cubo de bronce de 5 cm de lado con un termopar instalado en el centro, y lo deja en hielo toda la noche para que alcance una temperatura uniforme de $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Al día siguiente, lo sumerge en un baño de agua hirviente a $100 \text{ }^\circ\text{C}$. De acuerdo a la lectura registrada por el termopar, el centro del cubo alcanza $99.9 \text{ }^\circ\text{C}$ en 4 minutos con 7 segundos. Asumiendo que la transferencia de calor ocurre de manera idéntica en las tres direcciones del cubo, ¿cuál es el valor del coeficiente de transferencia de calor

por convección? El bronce empleado tiene una densidad de 8.8 g/cm^3 , un calor específico de $0.1 \text{ cal/g}\cdot^\circ\text{C}$ y una conductividad térmica de $52 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.

RESPUESTA: $1040 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

EJERCICIO 22

Adaptado de Incropera (2006)

Usted ha experimentado el enfriamiento por convección si alguna vez sacó la mano por la ventana de un vehículo en movimiento o si la sumergió en una corriente de agua. Si la superficie de la mano se asume a una temperatura constante de 30°C , determine la pérdida de calor por convección para (A) una velocidad del vehículo de 35 km/h en aire a -5°C , y (B) una velocidad de 20 cm/s en una corriente de agua a 10°C . ¿En cuál condición se sentirá más frío?

RESPUESTA: (A) 1345.7 W/m^2 (B) 21575 W/m^2

EJERCICIO 23 – OPCIONAL

Un calentador cilíndrico de 10 mm de diámetro se coloca en una corriente de agua, de forma que ésta circula en flujo cruzado alrededor del calentador. La temperatura y velocidad del agua son, respectivamente, 27°C y 5 cm/s . El material del cual está hecho el calentador tiene una densidad de 2700 kg/m^3 , una conductividad térmica de $240 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, y una capacidad calorífica de $900 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$. Estimar la temperatura en estado estable de la superficie del calentador cuando se disipa energía eléctrica a razón de 1 kW por cada metro de longitud del calentador.

RESPUESTA: 47.6°C

EJERCICIO 24

Una tubería horizontal de 1 plg de diámetro externo se encuentra en aire a 25°C y 1 atm de presión absoluta. La superficie externa de la tubería está a una temperatura uniforme de 100°C . Calcular la rapidez con la que la tubería pierde calor en (W/m^2) si: (A) el aire circundante se encuentra en reposo; (B) el aire circundante fluye perpendicularmente a la tubería con una velocidad de 0.5 m/s .

RESPUESTA: (A) 597.1 W/m^2 ; (B) 1062.8 W/m^2

EJERCICIO 25

(vaca esférica)

RESPUESTA: (A) 236.6 W , (B) 437.1 W

EJERCICIO 26

Se hace hervir agua en el exterior de tubos de cobre de 1 plg de diámetro y 75 cm de longitud. La presión del sistema es 1 atm . Los tubos se operan con una densidad de flujo de calor de 830 kW/m^2 . ¿Se tiene ebullición nucleada o en película? ¿Cuántos tubos se necesitan para producir 750 kg/h de vapor saturado? ¿Cuál es la temperatura superficial de los tubos?

RESPUESTA: 10 tubos, 109.5°C

EJERCICIO 27

Una barra cilíndrica de acero de 20 mm de diámetro y 200 mm de longitud, con una emisividad de 0.9 , se saca de un horno a 455°C y se sumerge horizontalmente en agua a presión atmosférica. Asumiendo ebullición en película, estimar la rapidez inicial con la que se transfiere calor de la barra al agua.

RESPUESTA: 92.876 kW/m^2

EJERCICIO 28

Una placa vertical de 50 cm de altura y 30 cm de ancho, cuya temperatura superficial se mantiene a 54°C, se pone en contacto con vapor de agua a 1 atm. Calcular la densidad de flujo de calor y el flujo másico del condensado.

RESPUESTA: 162.5 kW/m², 38.88 kg/h

EJERCICIO 29

Se tiene un fluido circulando por el interior de un tubo, y otro fluido diferente circulando por el exterior. Para el interior del tubo, el coeficiente convectivo es 1209 W/m²·K y el coeficiente de ensuciamiento es 1991 W/m²·K, mientras que para el exterior del tubo, el coeficiente convectivo es 7600 W/m²·K y el de ensuciamiento es 2750 W/m²·K. El tubo está hecho de bronce (de conductividad 52 W/m·K), su diámetro externo es 3/4 plg, y el espesor de la pared es 1/16 plg. Calcular el coeficiente global de transferencia de calor basado en el área externa, y el coeficiente global de transferencia de calor basado en el área interna.

RESPUESTA: $U_e = 471 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, $U_i = 565 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

EJERCICIO 30

Para enfriar un aceite, se emplea un intercambiador de calor de tubos concéntricos formado con un tubo interior de pared delgada por donde circula agua (720 kg/h, entrando a 30 °C), y un tubo exterior por donde circula el aceite (450 kg/h, entrando a 100 °C). Se desea que el aceite salga del intercambiador a 55 °C. El intercambiador está conectado para flujo en contracorriente, con un coeficiente global de transferencia de calor de 240.6 W/m²·K. Calcule la cantidad total de calor transferido (en kW), la temperatura de salida del agua, y el área de transferencia requerida en el intercambiador. El calor específico del aceite es 2000 J/kg·K, y el del agua se puede asumir como 4200 J/kg·K.

RESPUESTA: 11.25 kW, 43.39 °C, 1.209 m²

EJERCICIO 31

En una planta de procesamiento de lácteos, se necesita enfriar una corriente de leche de vaca, inicialmente a temperatura corporal, hasta una temperatura adecuada para su refrigeración. Para ello se va a emplear un intercambiador de calor de coraza y tubos, con agua como fluido de enfriamiento. El coeficiente global de transferencia de calor para el intercambiador es 1000 W/m²·K. Determinar el tipo adecuado de intercambiador a usar, la temperatura de salida del agua y el área requerida de transferencia de calor.

	\dot{V} (m ³ /h)	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg·K)	T_e (°C)	T_s (°C)
leche	2.5	1030	3860	38.6	13
agua	7.2	1000	4200	10	?

RESPUESTA: intercambiador 2-4, 18.41 °C, 9.445 m²

EJERCICIO 32

Se emplea un intercambiador de calor de coraza y tubos 1-2 para enfriar una corriente de etilenglicol ($\dot{m} = 2.1 \text{ kg/s}$, $c_p = 2470 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$) empleando una corriente de agua de río ($\dot{m} = 5 \text{ kg/s}$, $c_p = 4180 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$). Los fluidos entran a 75 °C y 25 °C, respectivamente. El intercambiador tiene un área total de 9.12 m², y en las condiciones en las que se operará se estima que el coeficiente global de transferencia de calor es 850 W/m²·K. Determinar el número de unidades de transferencia del intercambiador y las temperaturas de salida de ambos fluidos.

RESPUESTA: $N_T = 1.495$; el etilenglicol sale a 39.8 °C y el agua sale a 33.7 °C

