Fenómenos de Transporte 2

Ejercicios Enero – Junio 2019

EJERCICIO 1

Estimar la conductividad térmica del nitrógeno gaseoso a 135 °C y 1 atm. 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

Estimar la conductividad térmica de la acetona a 500 °C y 100 atm, sabiendo que a 353 K y 1 bar es 0.0157 W/m·K.

RESPUESTA: 0.0535 W/m·K

EJERCICIO 3 – OPCIONAL

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

RESPUESTA: 0.0268 W/m·K

EJERCICIO 4

Estimar la conductividad térmica del etanol 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 0.174 W/m·K (Perry, 2004).

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

EJERCICIO 5

Estimar la conductividad térmica de una mezcla líquida equimolar de benceno y tolueno a 35 °C. Las conductividades de los compuestos puros son 0.488 y 0.4566 W/m·K, respectivamente.

RESPUESTA: 0.4654 W/m·K

EJERCICIO 6

Genuino salmón del Pacífico Noroeste (Oregón, para más señas) 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 el porcentaje de hielo y la conductividad térmica (empleando el modelo paralelo) del salmón cuando se congela a −40 °C.

RESPUESTA: 69.9% hielo, 2.044 W/m·K

EJERCICIO 7

Determinar la densidad de flujo de calor emitido por radiación (de acuerdo a la ley de Stefan-Boltzmann) y la longitud de onda a la cual se emite la máxima cantidad de radiación (de acuerdo a la ley de Wien) para cada uno de los objetos siguientes, tratados como si fueran cuerpos negros: (**A**) una persona a temperatura ambiente, 25 °C, (**B**) un horno a 180 °C, y (**C**) la superficie del Sol a 5000 K.

RESPUESTA: (A) 448 W/m², 9.67 μm, (C) 3.54×10^{7} W/m², 576.8 nm.

EJERCICIO 8

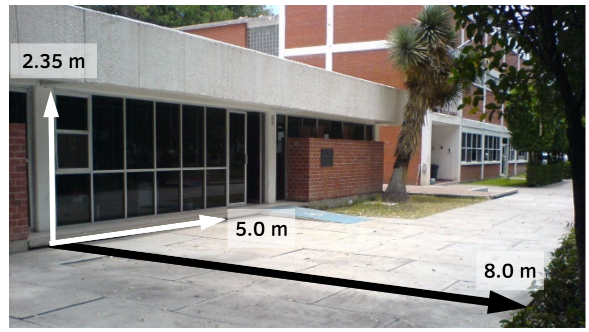
Se está preparando una hamburguesa de 12.5 cm de diámetro en el centro de un asador circular de 30 cm de diámetro. La temperatura del carbón es 470 °C, la de la superficie de la hamburguesa es 76 °C; y la distancia entre ambos es 5 cm. Determinar la rapidez (en watts) con la que se transfiere calor desde el carbón a la hamburguesa, sabiendo que la emisividad del carbón es 0.75 y la emisividad de la hamburguesa es 0.98.

RESPUESTA: 163.38 W

EJERCICIO 9 – OPCIONAL

En realidad, me gusta mucho mi oficina de la zona sur(*). 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. Si en un día soleado el suelo alcanza una temperatura de 55 °C, y la ventana está a 25 °C, y asumiendo que la emisividad del concreto del suelo es 0.88 y la emisividad de la ventana es 0.91, estimar la rapidez neta de transferencia de calor por radiación, del suelo a la ventana de mi oficina.

(*) Pronto tal vez ya la tenga que desocupar ☹.



RESPUESTA: 754 W.

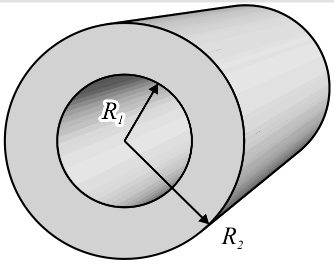
EJERCICIO 10 – REPASO DE ECUACIONES DIFERENCIALES (OPCIONAL)

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

RESPUESTAS:

1. $\dfrac{dy}{dx} - 3x^2 + 1 = 0$ — $y = x^3 - x + C$
2. $\dfrac{dy}{dx} + e^{-3x} = 0$ — $y = \dfrac{1}{3}e^{-3x} + C$
3. $\dfrac{d}{dx}\left(x\dfrac{dy}{dx}\right) = 0$ — $y = C_1 \ln x + C_2$
4. $x\dfrac{dy}{dx} - 2y = 6$ con $y = -1$ cuando $x = 1$ — $y = 2x^2 - 3$
5. $\dfrac{d^2y}{dx^2} + 9y = 0$ — $y = C_1 \operatorname{sen}(3x) + C_2 \cos(3x)$
6. $\dfrac{d^2y}{dx^2} - 10\dfrac{dy}{dx} + 25y = 0$ — $y = C_1e^{5x} + C_2xe^{5x}$
7. $\dfrac{d^2y}{dx^2} - 4\dfrac{dy}{dx} + 5y = 0$ — $y = C_1e^{2x}\operatorname{sen} x + C_2e^{2x}\cos x$
8. $\dfrac{d^2y}{dx^2} - \dfrac{dy}{dx} - 2y = 0$ sujeta a $y(0) = 3$ y $y'(0) = 0$ — $y = e^{2x} + 2e^{-x}$

EJERCICIO 11

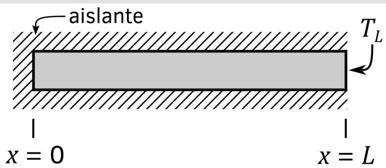


Considérese un cilindro hueco de radio interior R_1 y radio exterior R_2 y longitud L. Las superficies interna y externa del cilindro se mantienen a temperaturas constantes T_1 y T_2, respectivamente, y los extremos del cilindro se mantienen aislados. Mediante simplificación de la ecuación de conservación de la energía térmica, obtener el perfil de temperaturas $T(r)$ en estado estable, para $R_1 \le r \le R_2$.

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

EJERCICIO 12

Se tiene una barra metálica recta de longitud L que está aislada en todos sus lados excepto en el extremo $x = L$, que se mantiene a una temperatura constante T_L. En la barra hay una generación de calor no uniforme dada por $\dot{G} = ax(L-x)$, donde a es una constante con unidades W/m⁵. Determinar el perfil de temperatura en estado estable $T(x)$ así como la temperatura máxima en la barra.



RESPUESTA: $T(x) = T_L + \dfrac{aL^4}{12k}\left[\left(\dfrac{x}{L}\right)^4 - 2\left(\dfrac{x}{L}\right)^3 + 1\right]$, $\quad T_{\max} = T_L + \dfrac{aL^4}{12k}$

EJERCICIO 13 – OPCIONAL

Un fluido newtoniano de propiedades constantes se mueve en flujo laminar estable por el interior de una tubería de radio interno R y longitud L, con un perfil de velocidad dado por:

$$v_z = \frac{(\Delta\mathscr{P})R^2}{4\mu L}\left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right]$$

donde $\Delta\mathscr{P}$ es la diferencia de presión entre los extremos de la tubería y μ es la viscosidad del fluido. Si la viscosidad y la velocidad del fluido son suficientemente altas, la disipación viscosa de energía, producida por las fuerzas de fricción entre las capas de fluido, hace que la temperatura del fluido aumente. La pared de la tubería se mantiene a una temperatura constante T_w. Determinar el perfil de temperatura en este caso, en función de la posición r.

RESPUESTA: $T = T_w + \dfrac{(\Delta\mathscr{P})^2 R^4}{64\mu L^2 k}\left[1 - \left(\dfrac{r}{R}\right)^4\right]$

EJERCICIO 14

Una varilla de vidrio borosilicato (k = 1.4 W/m·K, α = 7.5×10⁻⁷ m²/s) de 4 mm de diámetro se va a someter a un tratamiento térmico para mejorar su resistencia mecánica. Para ello, se introduce durante 7.5 segundos en un horno, donde va a entrar en contacto con aire caliente a 350 °C. El coeficiente de transferencia de calor entre el aire y la varilla es 830 W/m²·K. Determinar la temperatura que alcanza el centro de la varilla, si su temperatura inicial era 20 °C.

RESPUESTA: 320 °C

EJERCICIO 15

Adaptado de Levenspiel, "Engineering Flow and Heat Exchange", Plenum Press.

Un método para preparar cacahuates tostados sin grasa consiste en llenar una canasta de malla de alambre con cacahuates crudos pelados y sumergirla en un contenedor lleno de manitol y sorbitol fundidos (azúcares de menor poder endulzante), en vez de sumergirla en aceite caliente. Cuando los cacahuates están bien tostados se sacan, escurren, salan ligeramente y entonces están listos para empacarse.

Si los cacahuates se encuentran originalmente a 15 °C y el líquido tostante se encuentra a 165 °C, determinar:

(**A**) El tiempo necesario para que sus centros alcancen 105 °C.
(**B**) Qué temperatura alcanza la superficie de los cacahuates en ese tiempo.

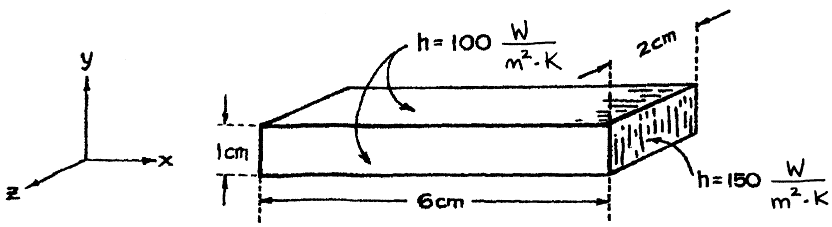
Asumir que los cacahuates son aproximadamente esféricos con diámetro de 7.5 mm y tienen las siguientes propiedades: conductividad térmica 0.5 W/m·K, densidad 1150 kg/m³, calor específico 1700 J/kg·K. El coeficiente de transferencia de calor por convección entre los azúcares fundidos y los cacahuates es de 80 W/m²·K.

RESPUESTA: (A) 36.7 s, (B) 118.5 °C

EJERCICIO 16 – OPCIONAL

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

A cod fillet, about 6 × 1 × 2 cm, is taken from a cooler at 0 °C and slipped into hot oil at 180 °C. **What is the centerpoint temperature of the fillet after 5 minutes?**



For cod:
k = 0.5 W/m·K
α = 1.7 × 10^{-7} m²/s
ρ = 1050 kg/m³

For the fillet in the deep-fat fryer:
h = 150 W/m²·K for the two small faces
h = 100 W/m²·K for the four long faces

ANSWER: 149.85 °C

EJERCICIO 17

Una esfera metálica de masa m, diámetro D y temperatura inicial T_0 se sumerge en un gran volumen de un líquido a temperatura T_∞ (que se puede asumir constante), con el que intercambia calor de acuerdo a la ley de Newton del enfriamiento (h constante). Determinar la temperatura de la esfera en función del tiempo. Se puede asumir que la esfera tiene una temperatura uniforme.

RESPUESTA: $T = T_\infty + \left(T_0 - T_\infty\right) e^{\frac{-4\pi D^2 h}{m c_P} t}$

EJERCICIO 18

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, estimar la rapidez con que se pierde 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. (**C**, opcional) Explicar por qué se pierde el calor más rápidamente en el caso del agua, a pesar de que el aire está a menor temperatura.

RESPUESTA: (A) 1345.7 W/m² (B) 21575 W/m²

EJERCICIO 19

[vaca esférica]

RESPUESTA: (A) 239.2 W, (B) 441.9 W

EJERCICIO 20

Adaptado de Incropera (2006).

Se pone a hervir agua en una sartén de cobre pulido de 26 cm de diámetro. La temperatura del fondo del sartén es 115 °C. Determinar el coeficiente de transferencia de calor del sartén al agua, la densidad de flujo de calor, y qué tan rápido se está evaporando el agua (en kg/h). Asumir 1 atm de presión total.

RESPUESTA: 33044 W/m²·K, 294.4 W, 0.47 kg/h

EJERCICIO 21

Se tiene un fluido circulando por el interior de un tubo, y otro fluido diferente circulando por el exterior. El coeficiente de transferencia de calor por convección en el interior del tubo es h_i = 1035 W/m²·K, y el coeficiente de transferencia de calor por convección en el exterior del tubo es h_e = 1209 W/m²·K. El tubo está hecho de bronce (k = 52 W/m·K) y sus dimensiones son D_e = 1 plg, D_i = 0.782 plg y L = 6 ft. Calcúlese la resistencia térmica total, 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: R_T = 0.014546 K/W, U_e = 471.1 W/m²·K, U_i = 602.4 W/m²·K

EJERCICIO 22 – OPCIONAL

Se tiene un fluido circulando por el interior de un tubo, y otro fluido diferente circulando por el exterior del mismo tubo. El coeficiente de transferencia de calor por convección en el interior del tubo es h_i y el coeficiente de transferencia de calor por convección en el exterior del tubo es h_e. La conductividad térmica del material del tubo es k, y sus dimensiones son: diámetro externo D_e, diámetro interno D_i, y longitud L. Demostrar que el coeficiente global de transferencia de calor, basado en el área externa del tubo, está dado por:

$$U_e = \frac{1}{\dfrac{D_e}{D_i h_i} + \dfrac{D_e \ln\left(D_e / D_i\right)}{2k} + \dfrac{1}{h_e}}$$

EJERCICIO 23

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. Calcular 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, 43.4 °C, 1.209 m²

ASUMIR QUE LA VACA ES UNA ESFERA

Primero, algunos antecedentes…

Un granjero está preocupado porque sus vacas no están produciendo suficiente leche, y decide consultar algunos expertos para tratar de solucionar el problema. Pone un anuncio en el periódico solicitando ayuda profesional para su dilema y espera a que lleguen los especialistas…

El primero en llegar es un psicólogo. Él le dice al granjero que las vacas están estresadas. Opina que tienen recuerdos traumáticos de su infancia y que seguramente les hizo falta una figura paterna cuando eran terneras. Le recomienda al granjero hablar con ellas todas las tardes y ponerles música instrumental para que se relajen.

Luego viene un ingeniero industrial. Realiza un estudio de tiempos y movimientos mientras ordeñan cada vaca, y elabora un procedimiento interno para la ordeña. Con esto estima que la eficiencia de la producción aumentará en 17%, aunque recomienda instalar ordeñadoras automáticas para realizar la extracción de leche de manera rápida y consistente. Si el granjero sigue sus recomendaciones, posiblemente hasta se pueda certificar bajo la norma ISO 9001.

También va un decorador de interiores. Éste opina que el granero es muy monótono y pasado de moda. No sigue los principios básicos del Feng-Shui. Sugiere pintar el granero de tonos verdes y cafés, para recrear la sensación del ambiente natural en el que las vacas habrían vivido. También recomienda colocar plantas de interior y fotografías de llanuras y pastizales, que armonicen con el estilo general de la habitación.

Después llega un ingeniero civil. Toma las medidas del granero y divide el área total entre el número de vacas, descontando los pasillos para tránsito, y determina que las vacas están muy apretadas. Se necesita un granero más grande, donde a cada vaca se le puedan asignar por lo menos 3.47 m² de espacio.

Finalmente llega el científico. Después de meditar un poco sobre el problema, comienza a hacer cálculos y anotaciones en un pizarrón. El granjero, aunque no entiende nada de lo que está garabateado, se siente esperanzado porque ve que el científico es muy metódico en su desarrollo matemático. Después de varias horas de intensos cálculos, el científico anuncia triunfalmente que ha resuelto el problema, y empieza a explicarlo: **"Comenzamos asumiendo que la vaca es una esfera…"**

Cierto, estoy de acuerdo… no es un muy buen chiste. Pero resalta la sobre-simplificación que ocasionalmente se hace en ciencia e ingeniería. Aunque muchas veces esta simplificación permite llegar a una respuesta (y algo es mejor que nada) se debe tener cuidado de no llevarla al extremo, porque entonces puede ser que el modelo no tenga casi relación con el fenómeno real que se quiere estudiar.

Ahora sí, el ejercicio…

Una vaca se queda fuera del establo en una fría noche invernal. La vaca está tan asustada que se queda inmóvil. El granjero ya está listo para irse a dormir cuando se da cuenta de que la vaca no está en el granero, pero no quiere tener que salir por ella. Como el granjero sabe que la vaca puede sobrevivir durante la noche si pierde calor con una rapidez menor a 350 watts, decide hacer primero algunos cálculos para decidir si debe salir a buscarla.

La temperatura ambiente es 4 °C (que sería una temperatura típica de un refrigerador de carnicería) y no sopla viento. La piel de la vaca tiene una temperatura superficial de 28 °C. Estimar la rapidez con la que la vaca pierde calor (en watts) si se asume que la vaca es:

(**A**) una esfera de 1.1 m de diámetro.
(**B**) un cilindro horizontal de 80 cm de diámetro y 1.4 m de longitud (usar el área total del cilindro, asumiendo que el coeficiente de transferencia de calor calculado para la superficie lateral también se puede usar para los extremos del cilindro).

¿Es una buena suposición (principalmente para la vaca) asumir que es una esfera?