

EJERCICIOS PORTAFOLIO FENÓMENOS DE TRANSPORTE 2

EJERCICIO 1

Estimar la conductividad térmica del benceno en los siguientes casos: (A) como gas a 20°C y 0.05 atm, y (B) como gas a 740°C y 340 atm.

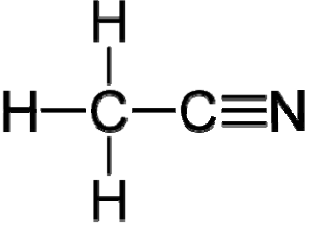
RESPUESTA: (A) 2.96×10^{-3} W/m·K; (B) 0.026 W/m·K

EJERCICIO 2

Construir una gráfica de la conductividad térmica de mezclas de amoníaco e hidrógeno a 33°C en función de la fracción mol de NH₃. A dicha temperatura, las viscosidades y conductividades de los componentes puros son 90.6 μP y 0.12624 W/m·K para el hidrógeno, y 105.9 μP y 0.02547 W/m·K para el amoníaco, respectivamente. Desarrollar un cálculo a mano a una cierta composición como ejemplo, y usar una hoja de cálculo para los demás puntos de la gráfica obtenerlos con ayuda de una hoja de cálculo.

EJERCICIO 3

El *acetonitrilo*, el más simple de los nitrilos, es un líquido incoloro empleado como solvente polar aprótico con aplicaciones en síntesis orgánica, así como en la purificación del butadieno. Se obtiene como subproducto en la fabricación de acrilonitrilo. Entre sus ventajas destacan su miscibilidad con agua, que es líquido en un amplio rango de temperaturas, y su capacidad de disolver una gran cantidad de sustancias iónicas y no polares debido a su elevado momento dipolo. Su baja viscosidad y escasa reactividad lo hacen útil como fase móvil en cromatografía líquida de alta resolución (HPLC, High Performance Liquid Chromatography). En dosis pequeñas es sólo moderadamente tóxico.

ACETONITRILLO 	Fórmula	CH ₃ -CN
	Número CAS	75-05-8
	Punto de fusión	-45 °C
	Punto de ebullición	81.6 °C
	Temperatura crítica	275.35 °C
	Presión crítica	48.3 bar
	Volumen molar crítico	173 cm ³ /mol
	Factor acéntrico	0.327
	Densidad de líquido	0.782 g/cm ³ @ 20°C
	Momento dipolo	3.5 debye

- (A) Estimar la conductividad térmica del vapor de acetonitrilo a 147°C y 1 atm.
(B) Estimar la conductividad térmica del acetonitrilo líquido a 15°C.
(C) Estimar la conductividad térmica de una solución acuosa de acetonitrilo al 30% peso a 15°C.

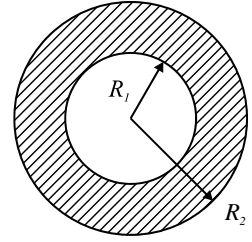
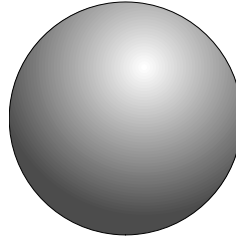
RESPUESTA: (A) 7.6×10^{-3} W/m·K; (B) 0.201 W/m·K; (C) 0.417 W/m·K

EJERCICIO 4

Ejercicio libre – Cada estudiante debe buscar en la bibliografía la conductividad térmica en fase gaseosa de alguna sustancia pura, y estimarla con el método de Champman-Enskog a las mismas condiciones de temperatura (y presión) que reporte su fuente bibliográfica. Calcular el error porcentual respecto al valor experimental. Indispensable anexar copia de la página donde aparece el dato experimental, con los datos bibliográficos correspondientes.

EJERCICIO 5

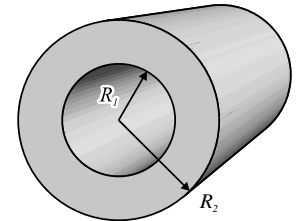
Considérese un cascarón esférico de radios interno y externo R_1 y R_2 , respectivamente. La superficie interna del cascarón se mantiene a una temperatura constante T_1 y la superficie externa se mantiene a una temperatura T_2 también constante. Haciendo un balance de energía en una envoltura esférica de espesor Δr , dedúzcase la ecuación diferencial para la conducción de calor en estado estable a través del cascarón. Resolver la ecuación diferencial para obtener el perfil de temperaturas en el cascarón.



$$\text{RESPUESTA: } \frac{k}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dT}{dr} \right) = 0 \rightarrow T(r) = T_1 + (T_2 - T_1) \frac{R_2 (r - R_1)}{r (R_2 - R_1)}$$

EJERCICIO 6

Simplificando la ecuación de conservación de la energía térmica en coordenadas cilíndricas, determínese el perfil de temperatura $T(r)$ en estado estable para un cilindro hueco de radio interno R_1 y radio externo R_2 , aislado en los extremos. Ambas superficies, interna y externa, se mantiene a la misma temperatura T_0 y en el material del cilindro hay una generación uniforme de calor G_0 (W/m^3).



$$\text{RESPUESTA: } T(r) = T_0 + \frac{G_0 R_1^2}{4k} \left[1 - \frac{r^2}{R_1^2} + \left(\frac{R_2^2}{R_1^2} - 1 \right) \frac{\ln(r/R_1)}{\ln(R_2/R_1)} \right]$$

EJERCICIO 7

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 sentiría más frío? Comparar con una pérdida de calor de aproximadamente $30 \text{ W}/\text{m}^2$ en condiciones ambientales normales.

$$\text{RESPUESTA: (A) } 1345.7 \text{ W}/\text{m}^2 \text{ (B) } 21575 \text{ W}/\text{m}^2$$

EJERCICIO 8

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

$$\text{RESPUESTA: } 47.6^\circ\text{C}$$

EJERCICIO 9

Un tubo de cobre de 1.5 pulgadas de diámetro interno transporta aire a una velocidad de 7.4 cm/s . El aire entra a una temperatura de 20°C y se desea que salga con una temperatura de 95°C . Por el exterior del tubo de cobre se está condensando vapor que mantiene al cobre a una temperatura uniforme de 100°C . Determinar la longitud necesaria del tubo para que el aire salga con la temperatura deseada.

$$\text{RESPUESTA: } 0.934 \text{ m}$$

EJERCICIO 10

Vaca esférica.

$$\text{RESPUESTA: Como esfera pierde } 236.6 \text{ W} \text{ y como cilindro pierde } 437.1 \text{ W}$$

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 de ordeñadoras automáticas para realizar la extracción de leche rápida y consistentemente. 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, ya que son más acordes con el ambiente en el que las vacas se sienten a gusto. 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 sus cálculos. Finalmente, 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..."



Ok, estoy de acuerdo... no es un muy buen chiste. Pero resalta la sobre-simplificación que frecuentemente 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 problema...

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 se quedó afuera, pero no quiere tener que salir por ella. Ya que sabe que la vaca puede sobrevivir durante la noche si no pierde calor con una rapidez mayor a 350 W, decide hacer primero algunos cálculos para ver 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 se encuentra a 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 de 80 cm de diámetro y 1.4 m de longitud (tomar el área total del cilindro, asumiendo que el valor de h 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?

EJERCICIO 11

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. Si se operan los tubos con una densidad de flujo de calor del 75% del flujo crítico, ¿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 12

Una barra 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/m²

EJERCICIO 13

Una placa vertical de 1.25 m de altura y 1 m de ancho, cuya temperatura superficial se mantiene a 54°C, se pone en contacto con vapor de agua a 1 atm. Calcular el flujo másico del condensado y la rapidez de transferencia de calor.

RESPUESTA: 0.0677 kg/s, 122.24 kW/m²

EJERCICIO 14

Considérese la transferencia de calor entre un fluido en el interior de un tubo y otro fluido en la parte externa. El tubo está hecho de bronce ($k = 52 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), tiene una longitud de 3 pies, su diámetro externo es 3/4 plg y su espesor de pared de 1/16 plg. Los coeficientes de transferencia de calor por convección para el interior y el exterior del tubo son, respectivamente, $h_i = 1209 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ y $h_e = 7600 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. El coeficiente de ensuciamiento, basado en el área externa del tubo, es $1040 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Calcular el coeficiente global de transferencia de calor basado en el área externa del tubo.

RESPUESTA: $U_e = 471.9 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$

EJERCICIO 15

Para enfriar un aceite, se emplea un intercambiador de calor de tubos concéntricos formado con un tubo interior de pared delgada de 25 mm de diámetro por donde circula el agua (0.15 kg/s, entrando a 30°C), y un tubo exterior de 45 mm de diámetro por donde circula el aceite (0.10 kg/s, entrando a 100°C). El intercambiador está conectado para flujo en contracorriente, con un coeficiente global de transferencia de calor de $60 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Se desea que el aceite salga del intercambiador a 60°C. Calcule la cantidad total de calor transferido, la temperatura de salida del agua, y el área de transferencia requerida en el intercambiador. El calor específico del aceite es $1900 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$, y el del agua se puede asumir como $4200 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$

RESPUESTA: 42.06°C, 2.984 m²

EJERCICIO 16

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 emplea un intercambiador de calor de coraza y tubos 2-4, con agua como fluido de enfriamiento. El coeficiente global de transferencia de calor para el intercambiador es $1000 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Calcular la temperatura de salida del agua y el área 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	0.25	1030	3860	38.6	13
agua	0.72	1000	4200	10	?

RESPUESTA: 18.41°C, 0.9445 m²

EJERCICIO 17

Considérese un intercambiador de calor de tubos concéntricos presurizado en los que entra 42 kg/h de agua caliente a 200°C y 84 kg/h de agua fría a 35°C. Si el intercambiador tiene $A = 0.33 \text{ m}^2$, $U = 180 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, y opera en contracorriente, determine el número de unidades de transferencia y las temperaturas de salida del agua caliente y el agua fría. Asumir $c_p = 4200 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ para ambas corrientes de agua.

RESPUESTA: $N_T = 1.21$, $T_{cs} = 96.88^\circ\text{C}$, $T_{fs} = 86.56^\circ\text{C}$

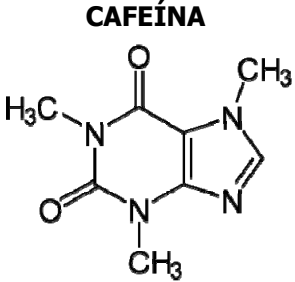
EJERCICIO 18

Estimar la difusividad del amoniaco en argón, a 255 K y 1 bar, aplicando (A) la teoría cinética de Chapman-Enskog, y (B) la extrapolación de Hirshfelder basándose en el valor reportado de $0.256 \text{ cm}^2/\text{s}$ a 333 K y 1 atm. En ambos casos, calcular el porcentaje de error sabiendo que el valor experimental de la difusividad a 255 K y 1 bar es $0.152 \text{ cm}^2/\text{s}$ (dato experimental de Srivstava y Srivastava, *Journal of Chemical Physics*, **36**:2616, 1962; citado por Reid, Prausnitz y Poling, "The Properties of Gases and Liquids", 1987).

RESPUESTA: (A) $0.155 \text{ cm}^2/\text{s}$, (B) $0.173 \text{ cm}^2/\text{s}$

EJERCICIO 19

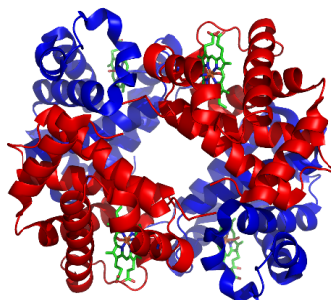
Uno de los métodos para extraer la cafeína de los granos de café es mediante dióxido de carbono supercrítico. **Estimar la difusividad de la cafeína en CO_2 a 400 K y 100 bar.** Usar la teoría cinética de Chapman-Enskog para estimar la difusividad del vapor de cafeína en CO_2 a baja presión, y asumir que las propiedades pseudocríticas de la mezcla a alta presión son iguales a las del CO_2 puro (suposición válida si la concentración de cafeína es baja).

	Fórmula molecular	$\text{C}_8\text{H}_{10}\text{N}_4\text{O}_2$
	Peso molecular	194.19 g/mol
	Punto de fusión	238 °C
	Punto de ebullición	N/D (sublima a 178°C)
	Temperatura crítica	N/D
	Presión crítica	N/D
	Volumen molar crítico	N/D
	Densidad (a 18 °C)	1.23 g/cm ³
	Solubilidad en 100 g de agua	2.1 g

N/D = no disponible.

RESPUESTA: $4.8 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$

EJERCICIO 20



La hemoglobina (ilustrada a la izquierda) es una molécula compleja encargada de transportar oxígeno y dióxido de carbono en la sangre. Tiene un peso molecular cercano a los 64,500 g/mol (Van Beekvelt *et al.*, 2001). La difusividad de la hemoglobina a dilución infinita en agua a 25 °C es $6.9 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$ (Cussler, 1997). De acuerdo al modelo de Stokes-Einstein, ¿cuál sería el radio de la molécula? ¿Cuál será su difusividad a 37°C?

Referencias:

Cussler E.L. (1997). "Diffusion: Mass Transfer in Fluid Systems". 2nd Edition, Cambridge University Press, 580 p.
Van Beekvelt M.C., Colier W.N., Wevers R.A., Van Engelen B.G. (2001). "Performance of near-infrared spectroscopy in measuring local O_2 consumption and blood flow in skeletal muscle". *J Appl Physiol* **90** (2): 511-519.

RESPUESTA: 3.55 nm, $9.26 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$

EJERCICIO 21

Estimar la difusividad del agua en acetona líquida a 0°C, empleando el método de Tyn y Calus (estimar el paracoro de la acetona empleando contribución de grupos). La viscosidad de la acetona a 0°C es 3.197×10^{-4} Pa·s.

RESPUESTA: 4.23×10^{-5} cm²/s

EJERCICIO 22

Estimar la difusividad del cloruro de calcio a dilución infinita en solución acuosa a 47°C.

RESPUESTA: 2.06×10^{-5} cm²/s

EJERCICIO 23

Considérese una esfera de un material permeable en la que ocurre la reacción química homogénea $A \longrightarrow B$, con una cinética de orden cero $-r_A = k_0$. Si la esfera se encuentra en un contenedor muy grande que tiene una concentración C_{A0} , determine expresiones matemáticas para el perfil de concentraciones C_A y la densidad de flujo molar $n_{A,r}$, ambas en función del radio. Demuestre también que la concentración del reactivo A en el centro de la esfera es cero si $k_0 = 6C_{A0}D_{AB} / R^2$.

$$\text{RESPUESTA: } C_A = C_{A0} - \frac{k_0}{6D_{AB}}(R^2 - r^2) \quad n_{A,r} = -\frac{k_0}{3}r$$

EJERCICIO 24

El exceso de acetona se quita de una lámina plástica durante su fabricación, dejando que se evapore en una corriente de nitrógeno gaseoso que fluye de forma paralela a la superficie de la lámina. La lámina mide 60 cm en la dirección del flujo. La corriente de nitrógeno se encuentra a 30°C y 1 atm (presión total absoluta), fluye a 4.7 cm/s, y tiene una cantidad residual de vapor de acetona (3 mmHg). Determinar la rapidez promedio con la que se transfiere la acetona de la lámina al nitrógeno (en g/m²·s).

RESPUESTA: 0.607 g/m²·s

EJERCICIO 25

Se necesita llevar a cabo un proceso en fase líquida que requiere la presencia de oxígeno. Para mantener cierta concentración de oxígeno disuelto, se propone burbujear oxígeno puro en el tanque. Las burbujas, producidas en el fondo del tanque, tienen un diámetro de 3 mm. La mezcla líquida tiene prácticamente las mismas propiedades físicas que el agua pura. Si el líquido se mantiene sin agitación, de forma que las burbujas asciendan sólo debido a la fuerza de flotación, **estimar el valor del coeficiente de transferencia de masa k_L (en m/s)**. El sistema está a 25°C y 1 atm (constantes). Como la solubilidad del oxígeno en agua es baja, se puede considerar que el sistema es diluido.

RESPUESTA: $k_L = 1.088 \times 10^{-3}$ m/s