

Operaciones Unitarias 2

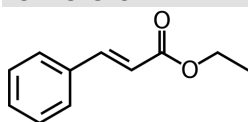
Ejercicios Agosto – Diciembre 2018

EJERCICIO 1

Estimar la difusividad del amoníaco en argón, a 255 K y 1 bar, aplicando (A) la teoría cinética de Chapman-Enskog, y (B) el método de Fuller. 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 cm²/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 cm²/s, (B) 0.171 cm²/s

EJERCICIO 2

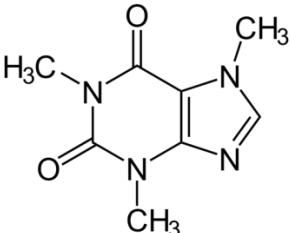


El cinamato de etilo C₆H₅-CH=CH-COO-CH₂-CH₃ (176.21 g/mol) es un componente del aceite esencial de canela (en inglés: cinnamon), responsable en parte de su olor característico. Estimar la difusividad del cinamato de etilo en aire, a 20 °C y 0.8 atm.

RESPUESTA: 0.0717 cm²/s

EJERCICIO 3 – OPCIONAL

La cafeína es un alcaloide (del grupo de las xantinas) de sabor amargo, estimulante del sistema nervioso central, y relacionado químicamente con la adenina y la guanina (bases del ADN y ARN). Muchas bebidas contienen cafeína, incluyendo el café y el té negro. Uno de los métodos para extraer la cafeína de los granos de café es mediante dióxido de carbono a alta presión.

CAFÉINA	
	Fórmula molecular
	Número CAS
	Peso molecular
	Punto de fusión
	Punto de ebullición
	Temperatura crítica
	Presión crítica
	Volumen molar crítico
	Densidad de sólido (18 °C)
	Solubilidad en 100 g de agua

N/D = no disponible.

- (A) Estimar la difusividad de la cafeína en CO₂ a 400 K y 1 bar, empleando el método de Chapman-Enskog.
 (B) Estimar la difusividad de la cafeína en CO₂ a 400 K y 100 bar, empleando el método de Takahasi. Asumir que las propiedades pseudocríticas son iguales a las del CO₂ puro (válido si la concentración de cafeína es baja).

RESPUESTA: (A) 0.060 cm²/s, (B) 4.8×10⁻⁴ cm²/s

EJERCICIO 4

La difusividad experimental del vapor de ácido acético en aire a 0° C y 1 atm es 0.1064 cm²/s (Perry, 7ª edición, Tabla 2.371). ¿Cuál será su difusividad a 80 °C y 2.5 atm?

RESPUESTA: 0.06257 cm²/s

EJERCICIO 5 - OPCIONAL

Por contribución de grupos, estimar el paracoro de los siguientes compuestos: (A) hexano, (B) fenol, (C) metil-terbutil-éter, (D) tiofeno.

RESPUESTAS: (A) 270.0; (B) 219.4; (C) 245.4; (D) 188.3 g^{1/4}·cm³/mol·s^{1/2}

EJERCICIO 6

Estimar la difusividad del ciclopentanol (C₅H₉OH) en agua a 20 °C, aplicando el modelo de Wilke-Chang.

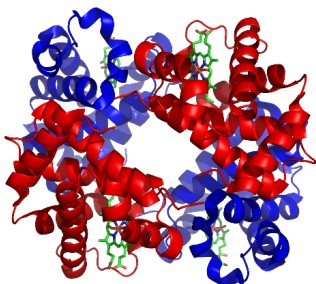
RESPUESTA: 9.84×10^{-6} cm²/s

EJERCICIO 7

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

RESPUESTA: 4.23×10^{-5} cm²/s

EJERCICIO 8



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, 2001). La difusividad de la hemoglobina a dilución infinita en agua a 25 °C es 6.9×10^{-7} cm²/s (Cussler, 1997). Estimar su difusividad a dilución infinita en agua a 37 °C?

Referencias:

Cussler E.L. (1997). "Diffusion: Mass Transfer in Fluid Systems". 2nd Edition, Cambridge University Press.
Van Beekvelt M.C., Collier W.N., Wevers R.A., Van Engelen B.G. (2001). "Performance of near-infrared spectroscopy in measuring local O₂ consumption and blood flow in skeletal muscle". *J Appl Physiol* **90** (2): 511-519.

RESPUESTA: 9.26×10^{-7} cm²/s

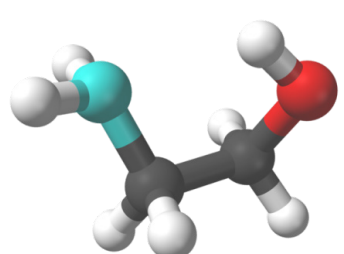
EJERCICIO 9

Estimar la difusividad del cloruro férrico en solución acuosa diluida a 39 °C.

RESPUESTA: 1.71×10^{-5} cm²/s

EJERCICIO 10

La **etanolamina** (también llamada 2-aminoetanol o monoetanolamina, abreviado MEA) es un compuesto orgánico que es a la vez una amina primaria y un alcohol primario. A temperatura ambiente es un líquido viscoso incoloro, inflamable y corrosivo con olor similar al amoníaco. Se emplea en solución acuosa para remover gases ácidos como el H₂S y el CO₂ de corrientes gaseosas. También se emplea como materia prima en la producción de detergentes, emulsificantes, medicamentos y varios intermediarios químicos.

ETANOLAMINA	Fórmula	NH ₂ -CH ₂ -CH ₂ -OH
	Número CAS	141-43-5
	Punto de fusión	10.35 °C
	Punto de ebullición	170.3 °C
	Temperatura crítica	340 °C
	Presión crítica	44.5 bar
	Volumen molar crítico	196 cm ³ /mol
	Factor acéntrico	0.838
	Densidad de líquido	1.012 g/cm ³
	Momento dipolo	2.6 debye

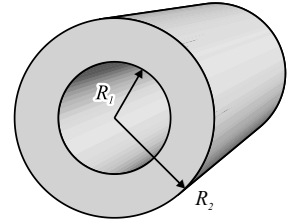
(A) Calcular la difusividad del vapor de etanolamina en aire a 230 °C y 3 atm.

(B) Calcular la difusividad de la etanolamina en dilución infinita en agua a 47 °C.

RESPUESTA: (A) 0.0862 cm²/s, (B) 2.026×10^{-5} cm²/s

EJERCICIO 11

Se emplea una tubo de membrana permeable (radio interno R_1 y radio externo R_2) para remover el dióxido de carbono de una corriente de aire cuya presión parcial de CO_2 es P_{A0} . El CO_2 se difunde radialmente a través de la pared del tubo desde el interior hacia el exterior, donde existe aire esencialmente libre de CO_2 . Al mismo tiempo, entra oxígeno a través de la pared, de tal forma que la presión total del sistema se mantiene constante. Aunque la presión parcial de CO_2 va a ir disminuyendo a lo largo del tubo, en este ejercicio se analiza sólo la difusión en la porción inicial del tubo, por lo que P_{A0} puede asumirse constante. (A) Encontrar el perfil de presión parcial de CO_2 en la pared del tubo. (B, opcional) Encontrar una expresión para la densidad de flujo molar de A ($n_{A,r}$).



$$\text{RESPUESTA: } P_A = P_{A0} \frac{\ln(r/R_2)}{\ln(R_1/R_2)}, \quad n_A = \frac{\mathcal{D}_{AB} P_{A0}}{rRT \ln(R_2/R_1)}$$

EJERCICIO 12

Se tiene dos recipientes idénticos llenos de una solución de un reactivo A, con concentración C_0 , que están unidos mediante un tubo de longitud total $2L$ lleno de un gel permeable. Este reactivo entra por difusión al gel, donde ocurre la reacción $A \longrightarrow B$ con una cinética de primer orden $-r_A = kC_A$. Ubicando el origen del sistema de coordenadas en el centro del tubo, determinar el perfil de concentración de A en función de la posición en el gel. Se puede asumir que el sistema es diluido.

$$\text{RESPUESTA: } C_A = C_0 \frac{\cosh(z\sqrt{k/\mathcal{D}_{AB}})}{\cosh(L\sqrt{k/\mathcal{D}_{AB}})}$$

EJERCICIO 13 – OPCIONAL

Considérese un medio semi-infinito que se extiende a partir de $x = 0$. Justo en $t = 0$, la concentración C_A de un soluto en $x = 0$ aumenta de cero a un valor C_0 constante. Inicialmente, no hay nada de soluto en el medio semi-infinito. Asumir que la concentración del soluto es lo suficientemente baja, de tal forma que el sistema se considera diluido. (A) Obtener la ecuación diferencial parcial que describe la difusión transitoria en el medio semi-infinito. (B) Resolver la ecuación diferencial mediante combinación de variables, usando $\eta = \frac{x}{\sqrt{4\mathcal{D}_{AB}t}}$ para encontrar el perfil de concentración $C_A(x,t)$.

$$\text{RESPUESTA: (A) } \frac{\partial C_A}{\partial t} = \mathcal{D}_{AB} \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} \quad \text{(B) } C_A = C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4\mathcal{D}_{AB}t}} \right) \right]$$

NOTA: El siguiente ejercicio también fue designado #13 por error. Como son de unidades diferentes, es menor el riesgo de confusión.

EJERCICIO 13

Un disco sólido de ácido benzóico de 25 mm de diámetro se encuentra girando a 20 rpm sumergido en un recipiente con agua a 25 °C, que tiene una concentración de ácido benzóico disuelto de 0.5 g/L. Calcular la rapidez con la que se está disolviendo el ácido benzóico (en g/cm²·s), sabiendo que el coeficiente de difusión del ácido benzóico en agua a 25 °C es 1×10^{-5} cm²/s y su solubilidad en agua a 25 °C es 3 kg/m³.

NOTA: Como el ácido benzóico es sólo escasamente soluble en agua, el sistema es diluido.

$$\text{RESPUESTA: } k = 8.96 \times 10^{-4} \text{ cm/s}, \quad n_A = 2.24 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^2\text{-s}$$

EJERCICIO 14

Se necesita promover el crecimiento de un microorganismo aerobio en un medio de cultivo líquido. Para mantener una alta concentración de oxígeno disuelto, se propone burbujear oxígeno puro en el tanque. Las burbujas, producidas en el fondo del tanque, tienen un diámetro promedio de 3 mm. El líquido se mantiene sin agitación, de tal forma que las burbujas ascienden sólo por flotación. El sistema está a 25 °C y 1 atm (constantes) y el medio de cultivo tiene las mismas propiedades que el agua pura. Estimar el valor del coeficiente de transferencia de masa k_L .

DATO ADICIONAL: $\mathcal{D}_{O_2-H_2O} = 2.4 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$.

RESPUESTA: $1.23 \times 10^{-4} \text{ m/s}$

EJERCICIO 15 – OPCIONAL

El exceso de acetona se quita de una lámina plástica durante su fabricación, dejando que se evapore en una corriente de aire que fluye de forma paralela a la superficie de la lámina. La lámina mide 60 cm en la dirección del flujo. La corriente de aire se encuentra a 40 °C y 1 atm (presión total absoluta), fluye a 47 cm/s, y tiene una cantidad residual de vapor de acetona (30 mmHg). Determinar la rapidez promedio con la que se transfiere la acetona de la lámina al aire (en mol/m²·s).

NOTA: Las propiedades para evaluar los números de Reynolds y Schmidt deben ser a la concentración promedio de la película. No se puede asumir que el sistema es diluido.

DATOS ADICIONALES:

- ★ Presión de vapor de la acetona a 40 °C: 0.5576 atm.
- ★ Difusividad del vapor de acetona en aire a 40 °C y 1 atm: 0.1338 cm²/s.
- ★ Viscosidad del vapor de acetona a 40 °C y 1 atm: $7.884 \times 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$.

RESPUESTA: 0.0674 mol/m²·s

EJERCICIO 16

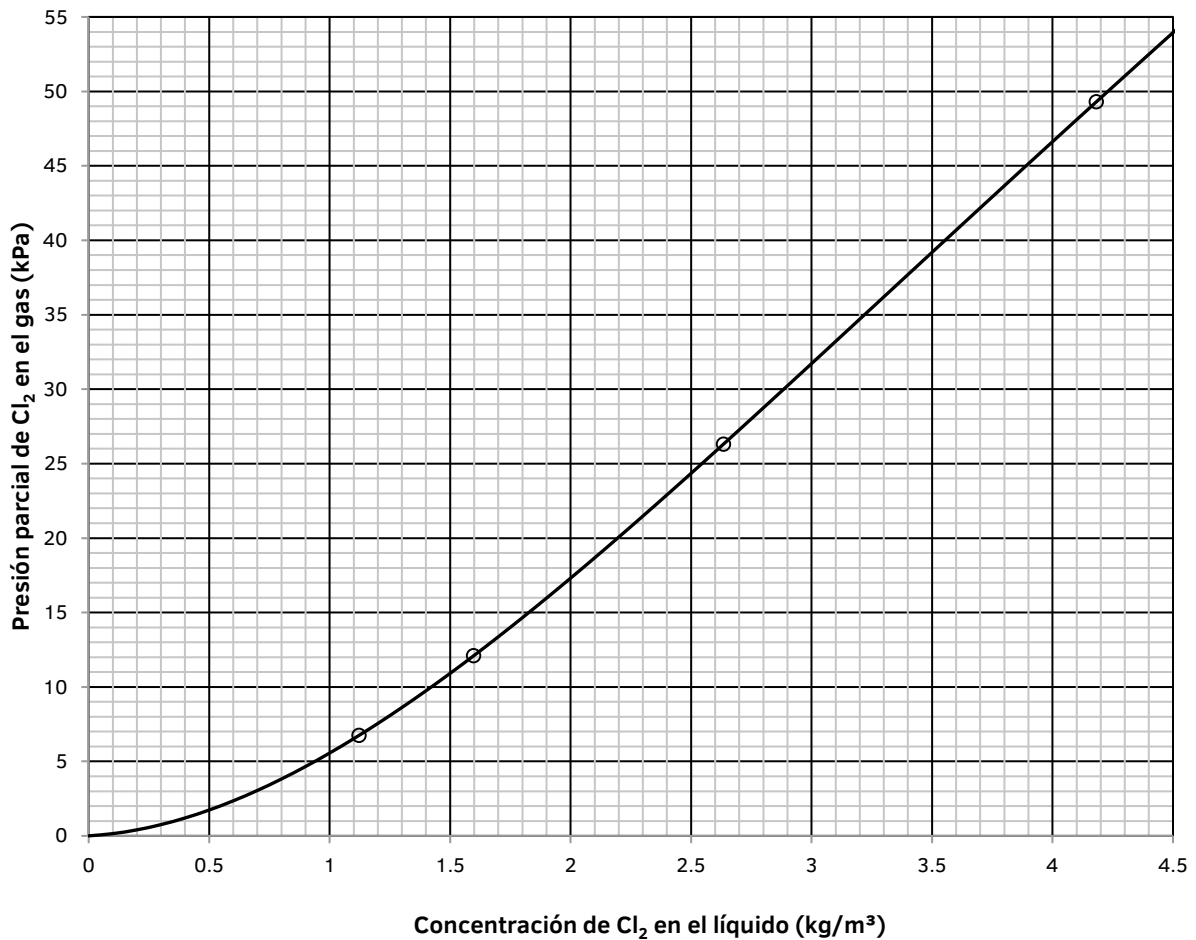
El agua clorada que se utiliza para blanquear la pulpa de papel se prepara por absorción de Cl₂ en agua. En ciertas condiciones de absorción, la presión parcial de cloro en la fase gaseosa es de 47 kPa y la concentración de cloro en el líquido es 0.2 kg/m³. El coeficiente global de transferencia de masa para el líquido es 3.16 m/h y el 20% de la resistencia a la transferencia de masa se presenta en la fase líquida. Para este caso, determinar lo siguiente:

- (A) los coeficientes individuales de transferencia de masa (en kg/kPa·m²·h y m/h, respectivamente).
- (B) las condiciones de la interfase (en kPa y kg/m³, respectivamente).
- (C) la densidad de flujo de transferencia de masa del cloro (en kg/m²·h).

Los datos disponibles para el equilibrio de cloro gaseoso con agua a 293 K (la temperatura de operación del equipo) se muestran en la tabla y en la gráfica:

Presión parcial de cloro (kPa)	6.74	12.1	26.3	49.3	97.7
Solubilidad del cloro (kg/m ³)	1.12	1.60	2.63	4.18	7.25

Datos adaptados de Welty, Wilson y Wicks, "Fundamentos de Transferencia de Momentum, Calor y Masa", Limusa.



RESPUESTA: (A) 0.288 kg/kPa·m²·h, 15.8 m/h, (B) $P_{A,i} = 5$ kPa, $C_{A,i} = 0.966$ kg/m³, (C) $n_A = 12.1$ kg/m²·h

EJERCICIO 17

Se utiliza un equipo de absorción para transferir un componente A desde el aire a un solvente líquido. En un punto determinado del equipo, la presión parcial de A en la corriente de gas es 0.21 atm y la concentración de A en la corriente del líquido es 6.24×10^{-5} lbmol/ft³. En esa misma parte del equipo, la rapidez de transferencia de masa de A entre el gas y el líquido es 0.0295 lbmol/ft²·h. El coeficiente individual de transferencia de masa para el gas es 0.295 lbmol/atm·ft²·h. En el intervalo de presiones y composiciones de interés, la línea de equilibrio (determinada por separado) es esencialmente recta, $P_A = mC_A$, con pendiente $m = 1280$ atm·ft³/lbmol.

(A) Completar los valores correspondientes en la siguiente tabla:

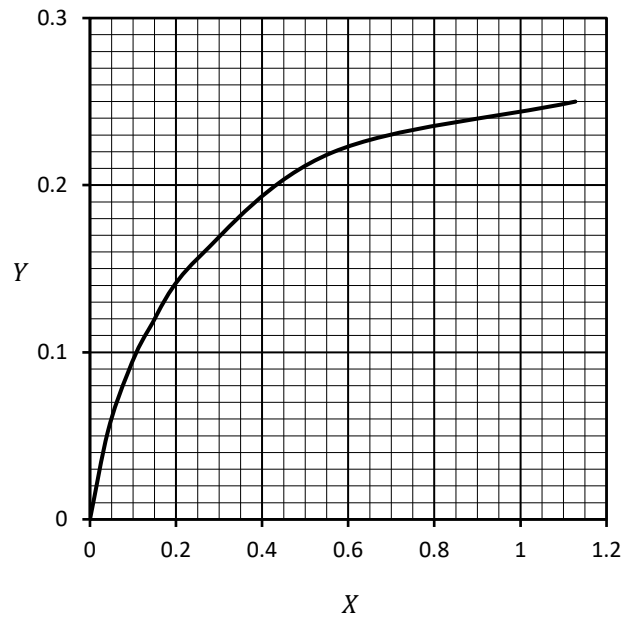
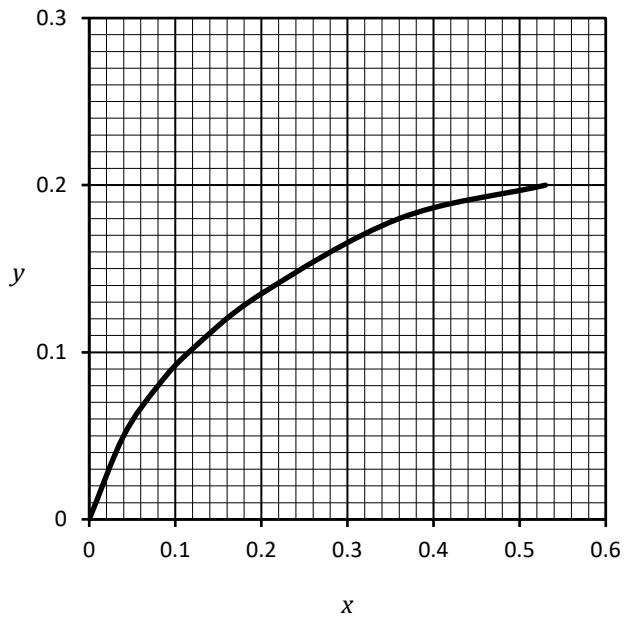
coeficiente de transferencia de masa	diferencia de composición que impulsa la transferencia
$k_G =$	$P_{A,G} - P_{A,i} =$
$k_L =$	$C_{A,i} - C_{A,L} =$
$K_G =$	$P_{A,G} - P_A^* =$
$K_L =$	$C_A^* - C_{A,L} =$

(B) ¿Qué porcentaje de la resistencia total a la transferencia de masa corresponde a la película de gas?

RESPUESTA: (B) 76.8%

EJERCICIO 18

A una columna empacada para absorción a contracorriente se alimentan 147 kmol/h de un gas que contiene 18.6% volumen de vapor de éter etílico y el resto de aire, a 25 °C y 1 atm de presión absoluta. Por la parte superior se alimenta un solvente líquido puro. Se requiere que el aire salga con un contenido máximo de éter de 6.5% volumen. Determinar el flujo mínimo de solvente (en kmol/h).



RESPUESTA: 42.28 kmol/h

EJERCICIO 19

A una columna empacada con anillos Raschig de cerámica se alimenta 300 m³/h de un gas que se lava a contracorriente con 670 LPM de un solvente líquido. Se desea que la columna opere con una caída de presión de 0.3 kPa/m. Determinar (A) el tamaño adecuado del empaque, y (B) el diámetro de la columna.

DATOS ADICIONALES: $\rho_G = 1.2 \text{ kg/m}^3$, $\mu_G = 700 \text{ }\mu\text{P}$, $\rho_L = 1.1 \text{ g/cm}^3$, $\mu_L = 1 \text{ cP}$.

RESPUESTA: (A) 1½ plg, (B) 0.66 m