Balance de Momentum, Calor y Masa

Ejercicios Feb – Jun 2022

EJERCICIO 0 (4 puntos)

Resolver cada una de las siguientes ecuaciones diferenciales. Cuando se proporcionen condiciones de frontera, usarlas para obtener la solución particular.

RESPUESTAS:

(A) $\frac{dy}{dx} - 3x^2 + 1 = 0$ $\quad y = x^3 - x + C$

(B) $\frac{dy}{dx} + e^{-3x} = 0$ $\quad y = \frac{1}{3}e^{-3x} + C$

(C) $x\frac{dy}{dx} - 2y = 6$ con $y = -1$ cuando $x = 1$ $\quad y = 2x^2 - 3$

(D) $\frac{d}{dx}\left(x\frac{dy}{dx}\right) = 0$ $\quad y = C_1 \ln x + C_2$

(E) $\frac{d^2y}{dx^2} - \frac{dy}{dx} - 2y = 0$ $\quad y = C_1 e^{2x} + C_2 e^{-x}$

(F) $\frac{d^2y}{dx^2} + 9y = 0$ $\quad y = C_1 \operatorname{sen}(3x) + C_2 \cos(3x)$

(G) $\frac{d^2y}{dx^2} - 4\frac{dy}{dx} + 5y = 0$ $\quad y = C_1 e^{2x} \operatorname{sen} x + C_2 e^{2x} \cos x$

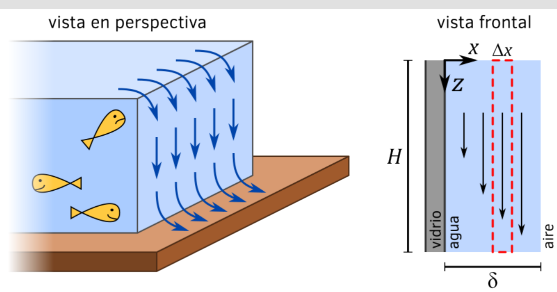
(H) $2\frac{d^2y}{dx^2} + 3\frac{dy}{dx} = 0$ sujeta a $y(0) = 11$ y $y'(0) = -10.5$ $\quad y = 4 + 7e^{-1.5x}$

Unidad 1 – Balances de Momentum

EJERCICIO 1 (10 puntos)

Una pecera está derramando agua por un costado, formando una capa vertical descendente de espesor δ uniforme (con ancho W y altura H). Empleando el sistema de coordenadas indicado en la figura, realizar un balance diferencial de momentum en un volumen de control de espesor Δx para encontrar el perfil de velocidad v_z en función de x. Determinar también la velocidad máxima.

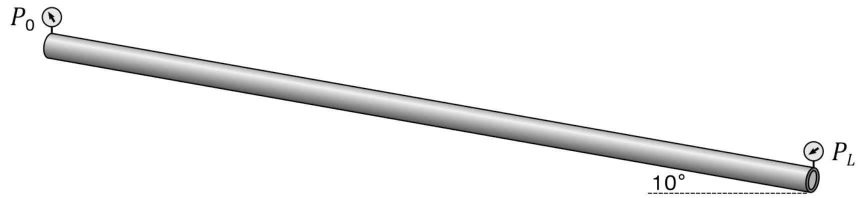
RESPUESTA: $v_z = \frac{\rho g}{2\mu}\left(2\delta x - x^2\right)$



EJERCICIO 2 (4 puntos)

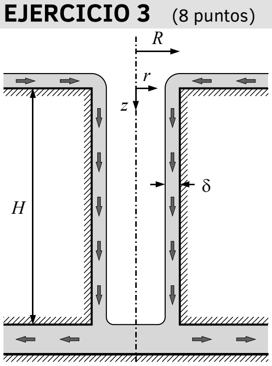
Se está bombeando glicerina a través de una tubería de 4" de diámetro interno y 12 m de longitud, que tiene una inclinación de 10° respecto a la horizontal. Las presiones en los extremos de la tubería, medidas con manómetros, son P_0 = 509.97 kPa y P_L = 379.21 kPa, respectivamente. Calcular el flujo volumétrico de la glicerina, en litros por minuto.

Propiedades de la glicerina: ρ = 1.26 g/cm³, μ = 1.5 Pa·s.



RESPUESTA: 1364 LPM

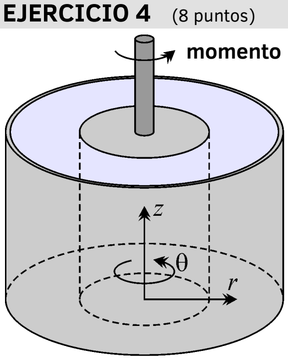
EJERCICIO 3 (8 puntos)



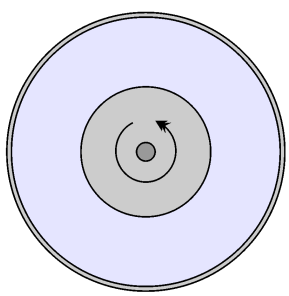
Se tiene un líquido newtoniano que escurre bajo la acción de la gravedad por dentro de un tubo vertical de altura H y radio interior R, formando una película laminar de espesor uniforme δ en la superficie interior del tubo. No interesan las variaciones en la parte superior (cuando el fluido ingresa al tubo y comienza a moverse hacia abajo) ni en la parte inferior (donde deja de moverse hacia abajo y se mueve horizontalmente). La temperatura y la presión son constantes en todo el sistema. Determinar el perfil de velocidad en estado estable del movimiento laminar descendente del fluido.

RESPUESTA: $v_z(r) = \dfrac{\rho g R^2}{4\mu}\left[1-\left(\dfrac{r}{R}\right)^2 + 2\left(\dfrac{R-\delta}{R}\right)^2 \ln\left(\dfrac{r}{R}\right)\right]$

EJERCICIO 4 (8 puntos)



vista en perspectiva



vista superior

El espacio entre dos cilindros coaxiales verticales se encuentra lleno con un líquido newtoniano a temperatura constante. El cilindro interno tiene radio R_1 y el cilindro externo tiene radio R_2. El cilindro interno gira con una velocidad angular constante Ω debido a la aplicación de un momento de giro; mientras que el cilindro externo se mantiene fijo. Mediante simplificación de las ecuaciones de conservación, determinar el perfil de velocidad v_θ para el movimiento laminar del fluido.

NOTA: Recordar que la velocidad tangencial es igual al producto de la velocidad angular por el radio de giro.

RESPUESTA: $v_\theta = \dfrac{\Omega R_1^{\,2} R_2}{R_2^{\,2} - R_1^{\,2}}\left(\dfrac{R_2}{r} - \dfrac{r}{R_2}\right)$

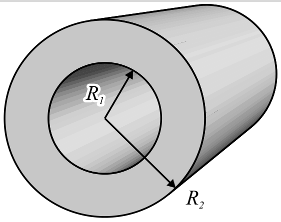
EJERCICIO 5 (10 puntos)

Obtener el perfil de velocidad de un fluido de la potencia que desciende por una pared vertical formando una película descendente laminar de espesor δ. Ubicar el origen del sistema de coordenadas en la parte superior de la pared.

RESPUESTA: $v_z = \dfrac{n}{n+1}\left(\dfrac{\rho g}{K}\right)^{\frac{1}{n}}\left[\delta^{\frac{n+1}{n}} - (\delta - x)^{\frac{n+1}{n}}\right]$

Unidad 2 – Balances de calor (parte 1)

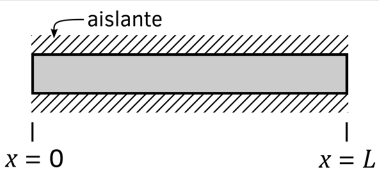
EJERCICIO 6 (4 puntos)



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. Obtener el perfil de temperatura en estado estable, para $R_1 \le r \le R_2$.

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

EJERCICIO 7 (6 puntos)



Una barra metálica recta de longitud L, aislada lateralmente, está sujeta a una generación de calor no uniforme dada por $\dot{G} = ax(L - x)$, donde a es una constante con unidades W/m⁵. Ambos extremos de la barra se mantienen a la misma temperatura T_0 (constante). Determinar el perfil de temperatura en la barra.

RESPUESTA: $T = T_0 + \dfrac{a}{12k}\left(x^4 - 2x^3L + xL^3\right)$

EJERCICIO 8 (6 puntos)

Adaptado de Bird (2002)

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

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

(**B**) Determinar la máxima temperatura en el interior de la esfera, si T_s = 150 °C, R = 1.35 plg, G_0 = 3.6×10⁶ W/m³, k = 2.5 W/m·K y b = 0.5.

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

EJERCICIO 9 (8 puntos)

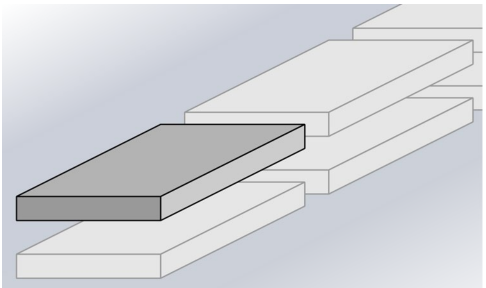
Un fluido newtoniano de propiedades constantes se mueve en flujo laminar estable por el interior de una tubería horizontal de radio interno R y longitud L, con el perfil de velocidad parabólico mostrado en la ecuación (derecha), donde ΔP es la diferencia de presión combinada entre los extremos de la tubería y μ es la viscosidad del fluido.

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

Si la viscosidad y la velocidad del fluido son suficientemente altas, la disipación viscosa de energía, debida a las fuerzas de fricción entre las capas de fluido, hace que la temperatura del fluido aumente. Si la pared de la tubería se mantiene a una temperatura constante T_w, determinar el perfil de temperatura en el fluido, en función de la posición r.

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

EJERCICIO 10 (4 puntos)



Un dispositivo de transferencia de calor cuenta con una serie de aletas rectas de sección transversal rectangular constante, que ayudan a transferir calor desde una superficie a 90 °C hacia el medio ambiente a 25 °C. Las aletas están hechas de aluminio (237 W/m·K), tienen 1 plg de ancho, 1/8 plg de espesor, y 3/4 plg de longitud (de la base al extremo libre). En las condiciones de operación del dispositivo, el coeficiente de transferencia de calor será 470 W/m²·K (constante). Analizando una sola de las aletas, determinar su eficiencia, efectividad y la rapidez con la que disipa calor.

RESPUESTA: η = 0.86, ε = 11.6, Q = 28.6 W

EJERCICIO 11 (4 puntos)

En un intercambiador de calor, se va a utilizar tubos de cobre (k = 400 W/m·K) de 1 plg de diámetro externo, equipados con aletas circulares extruidas de 1.75 plg de diámetro y 0.75 mm de espesor. La temperatura de la base de las aletas va a ser 95 °C, y el fluido alrededor del tubo va a estar a 40 °C. En las condiciones en las que se va a operar el intercambiador, se espera que el coeficiente de transferencia de calor entre las aletas y el fluido circundante será 3210 W/m²·K. Determinar cuánto calor transferirá cada aleta.

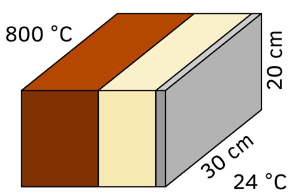
RESPUESTA: 210.3 W

EJERCICIO 12 (6 puntos)

Se desea utilizar aletas circulares de espesor uniforme para promover la transferencia de calor desde un tubo de 1 plg de diámetro. Las aletas deben tener 2 plg de diámetro y estarán fabricadas de acero inoxidable (15.1 W/m·K). La temperatura del tubo y del aire circundante son 85 °C y 21 °C, respectivamente. El coeficiente de transferencia de calor por convección es 80 W/m²·K. Determinar qué espesor (en milímetros) deben tener las aletas, si cada una debe disipar calor con una rapidez de 9.5 W.

RESPUESTA: 1.2 mm de espesor

EJERCICIO 13 (4 puntos)



La pared lateral 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 (0.26 W/m·K), 4 cm de fibra de vidrio (0.081 W/m·K) y una lámina de aluminio de 2.5 mm (273 W/m·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 24 °C. Las resistencias por convección a ambos lados de la pared se pueden asumir despreciables.

RESPUESTA: 74 W

EJERCICIO 14 (4 puntos)

(**A**) Considérese un tubo de diámetro externo D_e, diámetro interno D_i y longitud L, de un material con conductividad térmica k. Fluidos diferentes circulan por el interior y el exterior del tubo, dando lugar a coeficientes de transferencia calor por convección, h_i para la superficie interior y h_e para la superficie exterior del tubo. Demostrar que el coeficiente global de transferencia de calor, basado en el área externa del tubo, es:

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

(**B**) Utilizando la fórmula obtenida en el inciso (A), calcular el coeficiente global de transferencia de calor basado en el área externa, para el intercambio de calor entre dos fluidos separados por la pared de una tubería de bronce (k = 52 W/m·K) de diámetros 0.782 plg y 1 plg, interno y externo respectivamente. El coeficiente de transferencia de calor por convección en el interior del tubo es 1035 W/m²·K, y en el exterior del tubo es 1209 W/m²·K.

RESPUESTA: 471.1 W/m²·K

Unidad 3 – Balances de calor (parte 2)

EJERCICIO 15 (6 puntos)

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 bajo 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 1.15 g/cm³, calor específico 1.7 kJ/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 (4 puntos)

imagen: Freepik.com

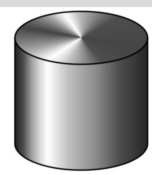
Un vial de vacunas, originalmente almacenado en un ultracongelador a −70 °C, se transfiere a un refrigerador que se mantiene a 7 °C para su descongelación y posterior aplicación. El vial es cilíndrico, con un diámetro de 1.8 cm. Si el vial tarda 17 minutos en alcanzar una temperatura promedio de 0 °C, ¿cuál es el valor del coeficiente de transferencia de calor, del aire del refrigerador al vial? Asumir que el vial tiene una conductividad térmica de 1.4 W/m·K y una difusividad térmica de 1×10^{-6} m²/s.

RESPUESTA: 15.5 W/m²·K

EJERCICIO 17 (8 puntos)

Un cilindro de aluminio (ρ = 2702 kg/m³, c_P = 0.903 kJ/kg·K, k = 237 W/m·K) de 12 cm de diámetro y 12 cm de longitud, inicialmente a 200 °C, se va a enfriar mediante un gran baño de aceite a 30 °C. Calcular la temperatura en el centro del cilindro y la cantidad de calor que se ha transferido, después de estar 75 s en el aceite. El coeficiente de transferencia de calor por convección es 847 W/m²·K.

(NOTA: el cilindro no puede considerarse infinitamente largo).



RESPUESTA: 90 °C, 373.8 kJ

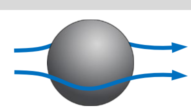
EJERCICIO 18 (6 puntos)

Una esfera metálica de masa m, diámetro D y temperatura inicial T_0 se sumerge en un gran recipiente lleno con un líquido a temperatura T_∞, con el que intercambia calor de acuerdo a la ley de Newton del enfriamiento (h constante). Se puede asumir que la esfera tiene una temperatura uniforme; es decir, que es un sistema de parámetros agrupados, y que la temperatura del líquido no cambia, por ser muy grande su volumen. (**A**) Realizando un balance de energía para la esfera, obtener la ecuación diferencial para la temperatura de la esfera. (**B**) Resolver la ecuación diferencial obtenida para encontrar la ecuación que describe la temperatura de la esfera en función del tiempo.

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

EJERCICIO 19 (4 puntos)

Para enfriar una esfera metálica de 1 plg de diámetro, cuya superficie se encuentra a 80 °C, se va a colocar en una corriente de agua a 10 °C moviéndose a 3.5 cm/s. Estimar el coeficiente de transferencia de calor por convección entre la esfera y el agua.



RESPUESTA: 961.17 W/m²·K

EJERCICIO 20 (8 puntos)

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. 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) 1363.9 W/m² (B) 21444 W/m²

EJERCICIO 21 (10 puntos)

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

La temperatura ambiente es 4 °C (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 de la superficie lateral aplica también para los extremos del cilindro).

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

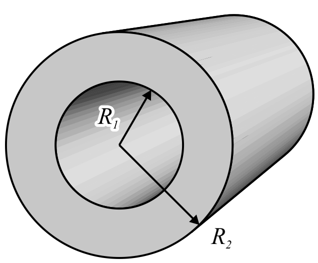
EJERCICIO 22 (10 puntos)

Se desea calentar un flujo de 50 LPM de agua a 10 °C haciéndolo circular por una tubería de cobre de ½ plg de diámetro. La superficie de la tubería se mantiene a una temperatura uniforme y constante de 95 °C. Determinar la longitud necesaria de la tubería para que la temperatura de salida del agua sea 74 °C.

RESPUESTA: 4.71 m

Unidad 4 – Balances de masa

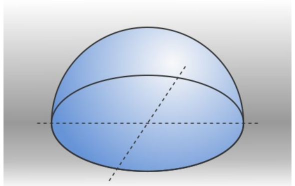
EJERCICIO 23 (10 puntos)



Se emplea un tubo de pared permeable a los gases (radio interno R_1 y radio externo R_2) para eliminar el dióxido de carbono de una corriente de aire cuya concentración de CO_2 es C_{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. En todo el sistema se mantiene la misma presión total. Aunque la presión parcial de CO_2 va a ir disminuyendo a lo largo del tubo, en este ejercicio se analiza solamente la difusión en la porción inicial del tubo, por lo que C_{A0} puede asumirse constante. (**A**) Obtener el perfil de concentración de CO_2 en la pared del tubo. (**B**) Determinar la densidad de flujo molar del CO_2.

RESPUESTA: $C_A = C_{A0}\dfrac{\ln(r/R_2)}{\ln(R_1/R_2)}$, $n_{A,r} = \dfrac{\mathscr{D}_{AB}C_{A0}}{r\ln(R_2/R_1)}$

EJERCICIO 24 (14 puntos)

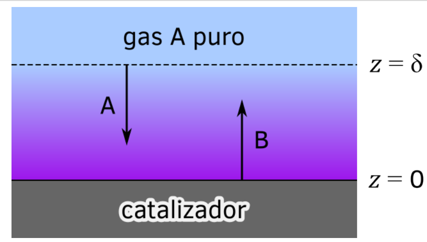


Una gota hemisférica de radio R de un líquido volátil puro (presión de vapor P_{vap}) se encuentra en una superficie plana horizontal. Determinar el perfil de concentración en estado estable para la fracción mol del vapor (y_A) al difundirse en el aire, en función de la distancia r (para $r > R$) desde el centro de la gota, asumiendo que muy lejos de la gota se tiene aire puro. No puede asumirse sistema diluido.

RESPUESTA: $y_A = 1 - \left(1 - \dfrac{P_{vap}}{P}\right)^{R/r}$

EJERCICIO 25 (16 puntos)

Considérese la transferencia de masa en una capa gaseosa en reposo cerca de la superficie de un catalizador. El componente A se difunde hacia el catalizador, donde reacciona instantáneamente para producir B de acuerdo a la reacción **2A** $\longrightarrow$ **B**. El componente B se difunde alejándose del catalizador. Más allá de la capa de difusión ($z \geq \delta$) se tiene gas A puro. El sistema se mantiene isotérmico e isobárico. Determinar el perfil de concentración en estado estable para la fracción mol de A en la región $0 < z < \delta$.



RESPUESTA: $y_A = 2\left[1 - \left(\dfrac{1}{2}\right)^{z/\delta}\right]$

Unidad 5 – Transferencia de masa en interfase

EJERCICIO 26 (10 puntos)

Para un equipo de transferencia de masa, que opera a 25 °C y 0.8 atm, se sabe que el coeficiente de transferencia de masa es k_G^0 = 0.272 kmol/atm·m²·h. El mismo equipo se va a utilizar para evaporar pentano, bajo las mismas condiciones de temperatura y presión. En la superficie donde ocurre la evaporación, la presión parcial de pentano es igual a su presión de vapor (0.673 atm a 25 °C), y el aire lejos de dicha superficie se puede asumir libre de pentano. Determinar los coeficientes de transferencia de masa k_G, k_C y k_y.

RESPUESTA: k_G = 0.595 kmol/atm·m²·h, k_C = 14.56 m/h, k_y = 0.476 kmol/m²·h

EJERCICIO 27 (14 puntos)

Una placa cuadrada de naftalina de 12 cm de lado se encuentra orientada paralela a una corriente de aire que se mueve a 0.473 m/s. El aire se encuentra a 25 °C y 1 atm (presión absoluta). La difusividad de la naftalina en el aire, a las condiciones del sistema, es 0.0586 cm²/s y su presión de vapor a 25 °C es 0.2 mmHg. Calcular la rapidez con la que se está sublimando la naftalina (en mol/m²·s).

RESPUESTA: 2.8335×10^{-5} mol/m²·s

EJERCICIO 28 (16 puntos)

Se necesita promover una oxidación química en una mezcla líquida. Para mantener la concentración necesaria de oxígeno disuelto, se va a burbujear oxígeno puro en el fondo del tanque. Las burbujas de oxígeno tienen un diámetro promedio de 2.5 mm. El líquido se mantiene sin agitación, por lo que las burbujas ascienden sólo por flotación. El sistema se mantiene a 30 °C y 1 atm. La densidad y viscosidad del líquido son, respectivamente, 1.15 g/cm³ y 3.3 cP. El oxígeno es sólo ligeramente soluble, por lo que se puede asumir un sistema diluido, y su difusividad en el líquido es 2.1×10^{-5} cm²/s. Estimar el valor del coeficiente de transferencia de masa k_L.

RESPUESTA: 7.66×10^{-5} m/s

EJERCICIO 29 (10 puntos)

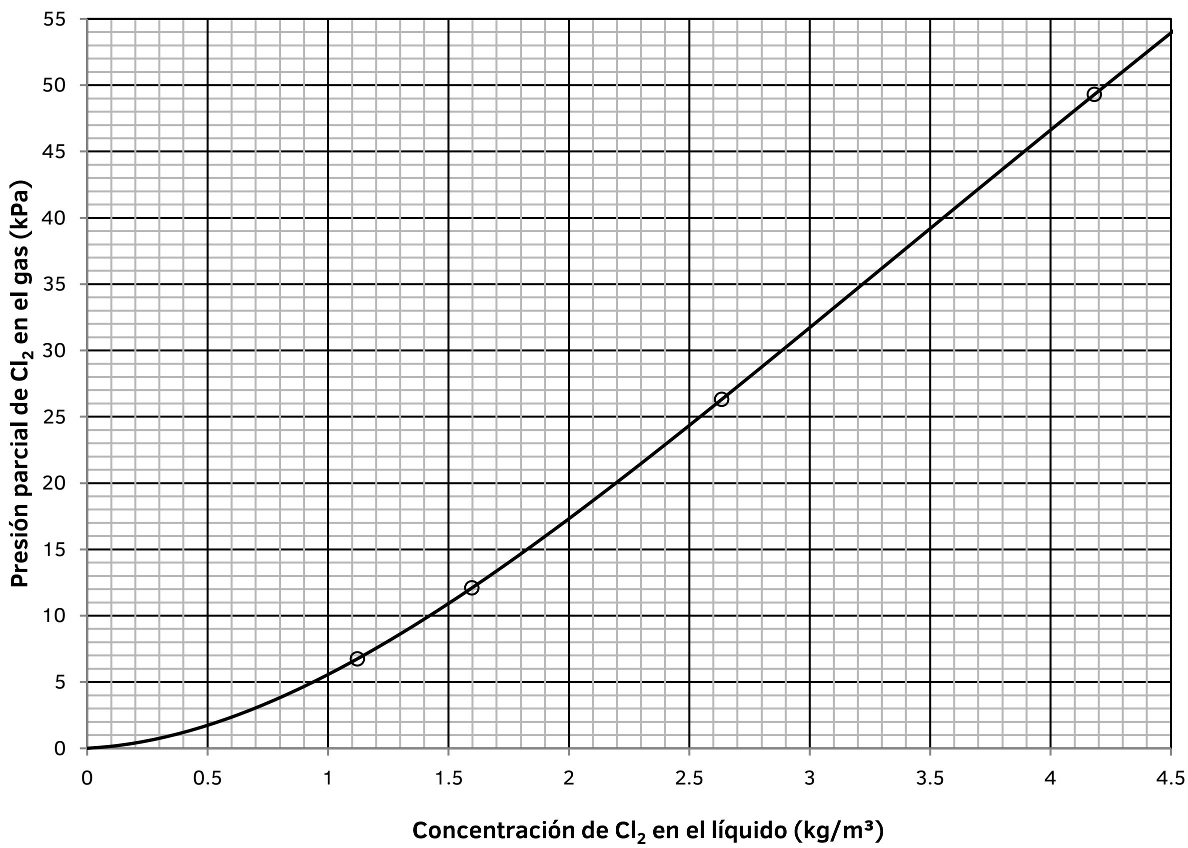
El agua clorada que se utiliza para blanquear la pulpa de papel se prepara por absorción de Cl_2 en agua a 293 K. En ciertas condiciones de operación en el sistema, la presión parcial de cloro en la fase gaseosa es de 47 kPa y la concentración de cloro en el líquido es 0.2 kg/m³. El coeficiente global 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. Determinar:

(**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 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/m³)	1.12	1.60	2.63	4.18	7.25

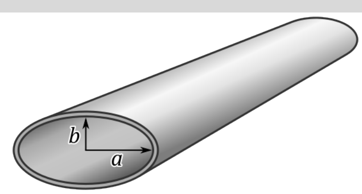
Datos adaptados de Welty, Wilson y Wicks, "Fundamentos de Transferencia de Momentum, Calor y Masa", Limusa.



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 30 (8 puntos)

Por una tubería de sección transversal elíptica circula agua a 1.5 m/s. La sección de la tubería tiene a = 0.2 m de semieje mayor y b = 0.1 m de semieje menor. Si el factor de fricción de Fanning, medido experimentalmente bajo estas condiciones, es 0.0045, estimar el coeficiente de transferencia de calor por convección entre el agua y la pared de la tubería, aplicando (**A**) la analogía de Chilton-Colburn, (**B**) la analogía de Prandtl, y (**C**) la analogía de von Kármán.



RESPUESTA: (A) 3182 W/m²·K, (B) 4735 W/m²·K, (C) 4066 W/m²·K