INSTITUTO TECNOLÓGICO DE DURANGO

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS QUÍMICA Y BIOQUÍMICA

Balance de Momentum, Calor y Masa

QI1720 ★ Ingeniería Química

Docente: Dr. Carlos Francisco Cruz Fierro

ACTIVIDAD 1

(8 puntos)

¿QUÉ ES “FENÓMENOS DE TRANSPORTE”?

INTEGRANTES DEL EQUIPO (POR APELLIDO, EN ORDEN ALFABÉTICO, MÁXIMO CINCO)	**NÚMERO DE CONTROL**

Intención didáctica

Concientizar al estudiante de la importancia de los fenómenos de transporte y su relación con las operaciones unitarias, así como generar una definición integral de esta área de estudio.

Indicaciones

1. Efectuar una investigación para obtener tantas definiciones como sea posible de “fenómenos de transporte”. En esta búsqueda, se considerará válida cualquier fuente impresa o electrónica.
2. Investigar la definición de las siguientes operaciones unitarias: bombeo de líquidos, intercambio de calor, humidificación de aire, secado, evaporación, destilación, cristalización, absorción, adsorción, extracción líquido-líquido, lixiviación.
3. Con la ayuda de otros compañeros y profesores de la carrera, para cada una de las operaciones unitarias mencionadas en el punto anterior, identificar si involucran transferencia de momentum, transferencia de calor o transferencia de masa (pueden involucrar más de una).
4. Con base en toda esta información, sintetizar como equipo su propia definición de “fenómenos de transporte”.

Sugerencias para el éxito de la actividad

★ Esta investigación pretende generar una **lluvia de ideas** respecto al concepto de “fenómenos de transporte”, en la que no se censuren de primera mano algunos aspectos que puedan contribuir a un concepto integral. Por esta razón, para esta actividad se considerará válida cualquier referencia, incluso fuentes en internet que en otras circunstancias no se considerarían confiables.

★ Es importante que consulten también libros relevantes para el curso (checar la bibliografía proporcionada el primer día de clase). Incluso si un libro del área no define propiamente “fenómenos de transporte”, es buena idea incluirlo en la investigación y reportar que carece de dicha definición.

★ También pueden preguntar en foros y grupos de discusión en línea.

Evidencias entregables

La evidencia de esta actividad lleva esta hoja de instrucciones cumpliendo las funciones de portada. Enumerar a continuación todas las definiciones encontradas de “fenómenos de transporte”, dando para cada una su referencia bibliográfica. Luego, las definiciones de las operaciones unitarias, indicando si involucran transferencia de momentum, calor o masa. Finalmente, presentar como equipo su definición sintética de qué es “fenómenos de transporte” y enunciar sus conclusiones individuales de la actividad.

ANÁLISIS DEL FLUJO LAMINAR EN TUBERÍA CIRCULAR

INTEGRANTES DEL EQUIPO (POR APELLIDO, EN ORDEN ALFABÉTICO, MÁXIMO CINCO)	**NÚMERO DE CONTROL**

Intención didáctica

Debido a que el flujo laminar en el interior de una tubería circular es uno de los casos más importantes en mecánica de fluidos, mediante esta actividad se analizará este caso paso por paso.

Indicaciones

Contestar el cuestionario, conforme a las instrucciones dadas en cada sección. En caso de que el espacio para la respuesta no sea suficiente, continuar en una hoja anexa, indicando claramente la continuación.

Evidencias entregables

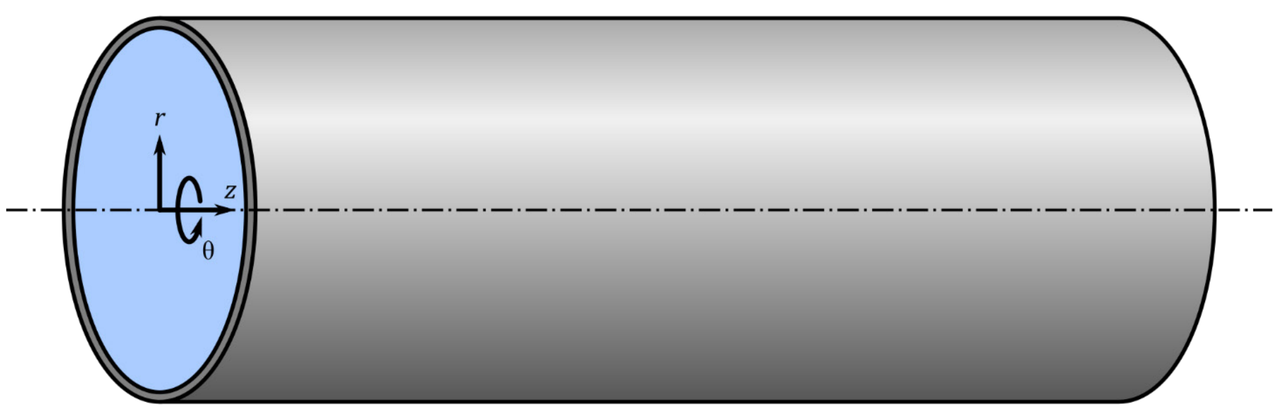
Entregar este cuestionario contestado, solamente un ejemplar por equipo. Opcionalmente, pueden anexar una breve investigación bibliográfica (aproximadamente dos páginas) respecto a las contribuciones de Osborne Reynolds y Jean Léonard Marie Poiseuille a la mecánica de fluidos. Una vez completada su evidencia, sólo integrante del equipo debe efectuar su entrega a través de Google Classroom.

Planteamiento del caso a analizar

Considérese una tubería cilíndrica horizontal de sección transversal circular (radio interno R y longitud L), a través de la cual circula de forma laminar un fluido newtoniano de propiedades constantes (ρ y μ), debido a una diferencia de presión entre los extremos (P_0 en el extremo izquierdo y P_L en el extremo derecho).

Sección 1

En el dibujo de la tubería que se muestra a continuación, se muestra el sistema de coordenadas cilíndricas, alineado con el eje de la tubería.



Sección 2 – Lista de suposiciones

A continuación se muestra la lista de suposiciones correspondientes a este caso. Para cada una, proporcionar una breve explicación de por qué es correcta la suposición.

SUPOSICIÓN	**EXPLICACIÓN**
1. Estado estable.	
2. $v_r = 0$ y $v_\theta = 0$.	
3. v_z varía en la dirección r, pero no depende de θ ni z.	
4. No se toma en cuenta efectos de borde.	
5. Fluido newtoniano de propiedades constantes.	

Sección 3 – Volumen de control

El volumen de control (mostrado en la figura) para el balance de momentum es un cilindro hueco de espesor Δr y longitud L, ubicado en el interior del fluido.

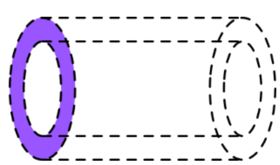
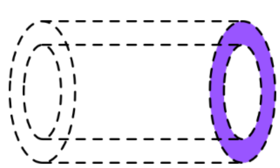
Obsérvese que el volumen de control es un cilindro hueco, dentro del fluido, pero que no incluye ni la pared ni el centro de la tubería. Este volumen de control es una “envoltura” porque envuelve parte del sistema analizado. Por esta razón, a este tipo de balance diferencial también se le conoce como “balance envolvente”.

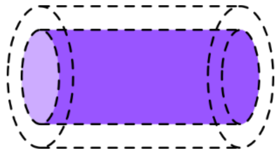
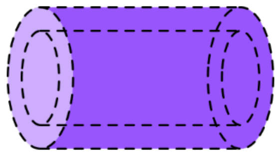
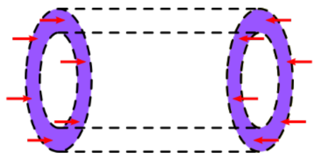
Para poder determinar el volumen ΔV del volumen de control, hay que obtener el volumen del cilindro externo (de radio $r + \Delta r$ y longitud L) y el volumen del cilindro interno (de radio r y longitud L), para luego restar estos dos volúmenes y simplificar el resultado, tomando en cuenta el hecho de que Δr es un valor pequeño.

RESPUESTA: $\Delta V = 2\pi r \Delta r L$

Sección 4 – Balance diferencial de momentum

La tabla siguiente lista cada contribución al balance de momentum en la dirección z, junto con el área relevante señalada en el volumen de control. En la columna de la derecha, deducir la expresión matemática de cada una de estas contribuciones al balance (recordando que las unidades de todos los términos en el balance deben ser kg·m/s).

CONTRIBUCIÓN		ÁREA	TÉRMINO DEL BALANCE
1	entrada de momentum por advección en $z = 0$		
2	salida de momentum por advección en $z = L$		

3	entrada de momentum por transporte viscoso en r		
4	salida de momentum por transporte viscoso en $r + \Delta r$		
5	generación de momentum por fuerzas de presión		$\underbrace{P_0 \cdot 2\pi r\Delta r \cdot \Delta t}_{\text{fuerza ejercida en el extremo izquierdo}} - \underbrace{P_L \cdot 2\pi r\Delta r \cdot \Delta t}_{\text{fuerza ejercida en el extremo derecho}}$ NOTA: La contribución de P_L es negativa porque esa fuerza va en la dirección contraria al eje z.

No existe generación de momentum por fuerzas de gravedad. Explicar por qué:

No existe acumulación de momentum en el volumen de control. Explicar por qué:

Escribir el balance completo: E − S + G = A:

Los dos términos de advección tienen el mismo valor y se cancelan entre sí. Explicar por qué:

Escribir el balance ya con estos dos términos eliminados:

Al dividir entre $2\pi r \Delta r L \Delta t$ (es decir, ΔV por Δt), se llega a la siguiente expresión:

$$\frac{\tau_{rz}\big|_r \cdot r - \tau_{rz}\big|_{r+\Delta r} \cdot (r+\Delta r)}{r\Delta r} + \frac{P_0 - P_L}{L} = 0$$

Una de las maneras de proceder en este punto, es un pequeño truco matemático. Recordar que la notación $\tau_{rz}\big|_r$ indica "el valor de τ_{rz} evaluado en la posición r". De la misma manera, $\tau_{rz}\big|_{r+\Delta r}$ significa "el valor de τ_{rz} evaluado en la posición $r+\Delta r$". Además, en el sistema de coordenadas que se está usando, r es la distancia medida desde el eje hasta el punto de interés. Así que, se plantea la siguiente equivalencia:

$$r \to r\big|_r \qquad\qquad r+\Delta r \to r\big|_{r+\Delta r}$$

En particular la segunda, $r\big|_{r+\Delta r}$ quiere decir "el valor de r [la distancia desde el eje] evaluada en la posición $r+\Delta r$", es decir, $r+\Delta r$. Con este cambio de notación, la ecuación se vuelve:

$$\frac{\tau_{rz}\big|_r \cdot r\big|_r - \tau_{rz}\big|_{r+\Delta r} \cdot r\big|_{r+\Delta r}}{r\Delta r} + \frac{P_0 - P_L}{L} = 0$$

y básicamente las dos cantidades multiplicadas (τ_{rz} y r) que están siendo evaluadas en la misma posición se pueden agrupar en una misma evaluación:

$$\frac{(r\tau_{rz})\big|_r - (r\tau_{rz})\big|_{r+\Delta r}}{r\Delta r} + \frac{P_0 - P_L}{L} = 0$$

Aquí se escribió el producto $r\tau_{rz}$ con el factor r primero simplemente por costumbre. Se puede decir que r y $r+\Delta r$ "se metieron" dentro de la evaluación en las posiciones r y $r+\Delta r$. De la misma manera que al "meter" una cantidad dentro de una raíz cuadrada entra elevado al cuadrado, al introducir $r+\Delta r$ dentro de la evaluación en la posición $r+\Delta r$ entra simplemente como r.

NOTA: No es la única manera de manejar estos términos, pero tiene la ventaja de llevar directamente a una forma fácil de resolver de la ecuación diferencial. Algo similar ocurre en algunos casos de coordenadas esféricas, con la variante de que r suele aparecer al cuadrado.

Acomodar de acuerdo a la definición de la derivada y tomar el límite $\Delta r \to 0$ para obtener la ecuación diferencial:

RESPUESTA: $-\frac{1}{r}\frac{d}{dr}(r\tau_{rz}) + \frac{P_0 - P_L}{L} = 0$

Sección 5 – Ley de Newton de la viscosidad

El componente del esfuerzo que aparece en la ecuación diferencial es τ_{rz} . Explicar qué significan estos dos subíndices:

Consultando la ley de Newton de la viscosidad en una tabla, se tiene:

$$\tau_{rz} = -\mu\left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r}\right)$$

Como $v_r = 0$, el primer término dentro del paréntesis se cancela. Además, v_z sólo depende de r, por lo que no es necesario emplear derivadas parciales, sino derivadas ordinarias. Por lo tanto, la ley de Newton se simplifica a:

$$\tau_{rz} = -\mu\frac{dv_z}{dr}$$

Al sustituir la ley de Newton en la ecuación diferencial de la sección anterior, se llega a:

$$-\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(r\tau_{rz}\right) + \frac{P_0 - P_L}{L} = 0 \quad \rightarrow \quad -\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left[r\left(-\mu\frac{dv_z}{dr}\right)\right] + \frac{P_0 - P_L}{L} = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{\mu}{r}\frac{d}{dr}\left(r\frac{dv_z}{dr}\right) + \frac{P_0 - P_L}{L} = 0$$

Sección 6 – Solución de la ecuación diferencial

Resolver la ecuación diferencial para llegar a la solución general:

RESPUESTA: $v_z = -\frac{P_0 - P_L}{4\mu L}r^2 + C_1 \ln r + C_2$

Sección 7 – Condiciones de frontera

A continuación se muestran las condiciones de frontera correspondientes a este caso analizado. Explicar el por qué de cada una.

CONDICIÓN DE FRONTERA	EXPLICACIÓN
1. $\dfrac{dv_z}{dr} = 0$ en $r = 0$	
2. $v_z = 0$ en $r = R$	

Sección 8 – Perfil de velocidades

La condición de frontera 1 no se puede sustituir directamente en la solución general, porque es para la derivada de la velocidad (dv_z / dr). Por esta razón, sería necesario primero derivar esta solución general. Afortunadamente, en este caso la derivada ya se había encontrado como parte del procedimiento de solución:

$$\frac{dv_z}{dr} = -\frac{P_0 - P_L}{2\mu L} r + \frac{C_1}{r}$$

La condición de frontera 1 se debe utilizar con esta derivada para encontrar el valor de C_1. Nótese que en este caso, al sustituir directamente la condición de frontera, se tendría división entre cero, por lo que es conveniente despejar C_1 antes de sustituir los valores.

Aplicar la condición de frontera 1 y encontrar la nueva solución general:

RESPUESTA: $v_z = -\dfrac{P_0 - P_L}{4\mu L} r^2 + C_2$

NOTA: En muchos libros de mecánica de fluidos, en vez de despejar y sustituir, simplemente argumentan que el único valor posible para C_1 es cero, de tal forma que se evite la división entre cero. Este argumento también se puede aplicar directamente en la solución general para v_z, donde aparece el término $C_1 \ln r$: el logaritmo se volvería $-\infty$ cuando $r = 0$, y la única manera de evitarlo es que C_1 sea cero.

Ahora se sustituye la segunda condición de frontera en la nueva solución general, y se despeja C_2:

RESPUESTA: $C_2 = \dfrac{P_0 - P_L}{4\mu L} R^2$

Esta constante C_2 se sustituye en la solución general, y se reacomoda para llegar al perfil de velocidad buscado:

RESPUESTA: $v_z = \dfrac{(P_0 - P_L) R^2}{4\mu L} \left[1 - \left(\dfrac{r}{R} \right)^2 \right]$

Sección 9 – Velocidad máxima

En algunos casos, la velocidad máxima puede determinarse por "simple inspección" del perfil de velocidad. En este caso, se puede observar que en el factor $\left[1 - (r / R)^2 \right]$, conforme r toma valores más grandes se le va restando al 1 un valor mayor (quedando un valor más chico). Sólo cuando $r = 0$ no se le quita nada al 1, y ése es el mayor valor que puede tener. Multiplicado ese 1 por el factor que está afuera del corchete, se ve que la velocidad máxima es:

$$v_{z,\max} = \frac{(P_0 - P_L) R^2}{4\mu L}$$

Cuando no es posible determinar la velocidad máxima por inspección, se recurre al criterio de máximos y mínimos. En este caso, sería necesario derivar el perfil de velocidad con respecto a r, igualar a cero, y despejar r. Éste sería el valor de r del lugar donde se encuentra la velocidad máxima (en este caso, se llegaría a $r = 0$). Luego, ese valor de r se sustituye en el perfil de velocidad para determinar la velocidad máxima.

En algunos casos, como éste, se puede expresar el perfil de velocidad en términos de la velocidad máxima:

$$v_z = v_{z,\max} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]$$

Sección 10 – Flujo volumétrico (ley de Hagen-Poiseuille)

El flujo volumétrico que circula por la tubería se puede obtener integrando el perfil de velocidad con respecto al área que está siendo cruzada por el fluido. Como en este caso sólo se tiene el componente z de la velocidad y siempre es perpendicular al área de sección transversal, el producto punto se vuelve una simple multiplicación:

$$\dot{V} = \int \mathbf{v} \cdot d\mathbf{A} \qquad \text{que en este caso se simplifica a:} \quad \dot{V} = \int v_z dA$$

donde el diferencial de área es $dA = r dr d\theta$. Considerando los límites de integración, el flujo volumétrico está dado entonces por:

$$\dot{V} = \int_{\theta=0}^{2\pi} \int_{r=0}^{R} v_z r dr d\theta$$

En la ecuación anterior, sustituir el perfil de velocidad y realizar las integraciones para obtener el flujo volumétrico:

RESPUESTA: $\dot{V} = \dfrac{\pi\left(P_0 - P_L\right)R^4}{8\mu L}$

Esta ecuación conoce como **ley de Hagen-Poiseuille**, y su importancia radica en que relaciona el flujo volumétrico con la caída de presión: ambos son parámetros muy importantes en el flujo de fluidos y son fácilmente medibles.

Obsérvese que en la ecuación de Hagen-Poiseuille, **el radio se encuentra elevado a la cuarta potencia**. Esta fuerte dependencia del radio significa que, para una misma caída de presión, una tubería del doble de radio tendría un flujo volumétrico 16 veces mayor.

Sección 11 – Velocidad media

Una vez que se tiene el flujo volumétrico, la velocidad media se obtiene con facilidad, pues simplemente hay que dividir $\dot{V}$ entre el área que está siendo cruzada por ese flujo. En este caso, dicha área es la sección transversal de la tubería, $A = \pi R^2$, por lo que la velocidad media es:

$$\langle v_z \rangle = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{\dfrac{\pi(P_0 - P_L)R^4}{8\mu L}}{\pi R^2} \qquad \therefore \qquad \langle v_z \rangle = \frac{(P_0 - P_L)R^2}{8\mu L}$$

Ocasionalmente, conviene comparar la velocidad media con la velocidad máxima, que se había encontrado previamente:

$$v_{z,\max} = \frac{(P_0 - P_L)R^2}{4\mu L}$$

de donde se puede observar fácilmente que para el caso de flujo laminar en una tubería de sección transversal circular se cumple la relación:

$$\langle v_z \rangle = \tfrac{1}{2} v_{z,\max}$$

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE DURANGO

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS
QUÍMICA Y BIOQUÍMICA

ACTIVIDAD 3
(16 puntos)

BALANCE DE ENERGÍA EN UNA ESFERA CON GENERACIÓN UNIFORME

INTEGRANTES DEL EQUIPO (POR APELLIDO, EN ORDEN ALFABÉTICO, MÁXIMO CINCO)	**NÚMERO DE CONTROL**

Intención didáctica

Determinar el perfil de temperatura en una esfera con generación de calor mediante un balance diferencial de energía.

Indicaciones

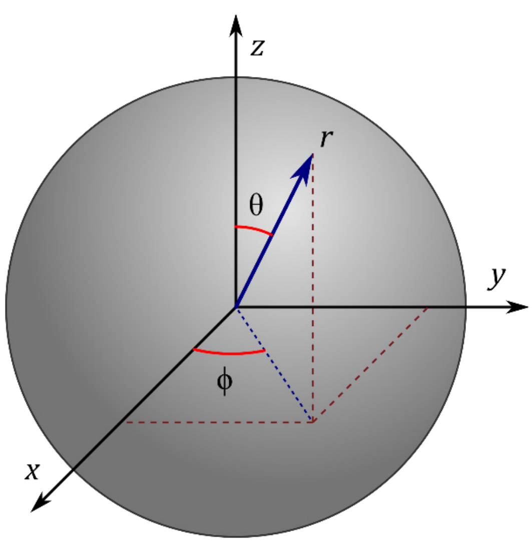
Contestar el cuestionario, conforme a las instrucciones dadas en cada sección. En caso de que el espacio para la respuesta no sea suficiente, continuar en una hoja anexa, indicando claramente la continuación.

Evidencias entregables

El reporte de esta actividad se elabora directamente en este documento, respondiendo las preguntas del cuestionario. Una vez completada su evidencia, sólo integrante del equipo debe efectuar su entrega a través de Google Classroom.

Planteamiento del caso a analizar

Considérese una esfera de radio R, hecha de un material sólido homogéneo de conductividad térmica constante, en el que ocurre una generación de calor uniforme G_0 (W/m³). La superficie de la esfera se mantiene a una temperatura constante T_s. En la figura se muestra la esfera con el sistema de coordenadas esférico (en relación con las coordenadas rectangulares). Determinar el perfil de temperatura en la esfera y la cantidad total de calor emitido desde la superficie.

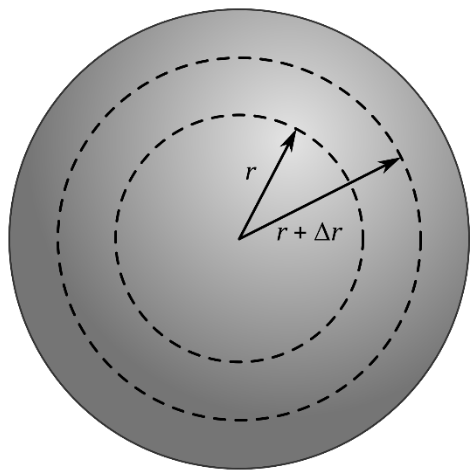


Sección 1 – Lista de suposiciones

Establecer las suposiciones que sean apropiadas para este caso.

Sección 2 – Volumen de control

El volumen de control para el balance de energía es una capa esférica de espesor Δr, entre las posiciones r y $r + \Delta r$. **Obsérvese que el volumen de control es un cascarón hueco, dentro de la esfera, y no incluye ni la superficie ni el centro de la esfera. Este volumen de control es una "envoltura" porque envuelve parte del sistema analizado. Por esta razón, a este tipo de balance diferencial también se le conoce como "balance envolvente".**

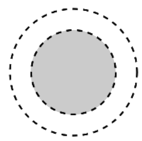
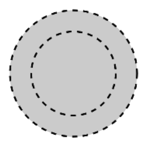
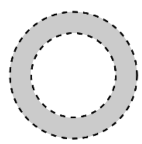


Determinar el volumen ΔV del volumen de control, a partir de la diferencia de volumen de la esfera externa menos el volumen de la esfera interna (con la necesaria manipulación algebraica, recordando que Δr es una cantidad pequeña):

RESPUESTA: $\Delta V = 4\pi r^2 \Delta r$

Sección 3 – Balance diferencial de energía

En la tabla se listan las contribuciones al balance de energía: hay una entrada y una salida por conducción, y hay generación en el volumen de control. La figura muestra dónde ocurre cada contribución. Determinar cada una de estas contribuciones, recordando que las unidades de todos los términos deben ser joules.

CONTRIBUCIÓN			TÉRMINO DEL BALANCE
1	entrada de calor por conducción en r		
2	salida de calor por conducción en $r + \Delta r$		
3	generación de calor en el volumen de control		

No existe acumulación de energía en el volumen de control. Explicar por qué:

Escribir el balance completo: E – S + G = A:

Al dividir entre $4\pi r^2 \Delta r \Delta t$ (es decir, ΔV por Δt), se llega a la siguiente expresión:

$$\frac{q_r\big|_r \cdot r^2 - q_r\big|_{r+\Delta r} \cdot (r+\Delta r)^2}{r^2 \Delta r} + G_0 = 0$$

Obsérvese que los dos términos de conducción se están manejando juntos y que no se canceló r^2 porque no aparece en ambos términos. Una de las maneras de proceder en este punto, es un pequeño truco matemático. Recordar que la notación $q_r\big|_r$ indica "el valor de q_r evaluado en la posición r". De la misma manera, $q_r\big|_{r+\Delta r}$ significa "el valor de q_r evaluado en la posición $r + \Delta r$". Además, en el sistema de coordenadas que se está usando, r es la distancia medida desde el eje hasta el punto de interés. Así que se plantea la siguiente equivalencia:

$$r \to r\big|_r \qquad\qquad r + \Delta r \to r\big|_{r+\Delta r}$$

En particular la segunda, $r\big|_{r+\Delta r}$ quiere decir "el valor de r [la distancia desde el eje] evaluada en la posición $r+\Delta r$", es decir, $r+\Delta r$. Con este cambio de notación, la ecuación se vuelve:

$$\frac{q_r\big|_r \cdot r^2\big|_r - q_r\big|_{r+\Delta r} \cdot r^2\big|_{r+\Delta r}}{r^2 \Delta r} + G_0 = 0$$

y las dos cantidades multiplicadas (q_r y r^2) que son evaluadas en la misma posición se pueden agrupar:

$$\frac{\left(r^2 q_r\right)\Big|_r - \left(r^2 q_r\right)\Big|_{r+\Delta r}}{r^2 \Delta r} + G_0 = 0$$

Aquí se escribió el producto $r^2 q_r$ con el factor r^2 primero simplemente por costumbre. Se puede decir que r^2 y $\left(r+\Delta r\right)^2$ "se metieron" dentro de la evaluación en las posiciones r y $r+\Delta r$. De la misma manera que al "meter" una cantidad dentro de una raíz cuadrada entra elevado al cuadrado, al introducir $\left(r+\Delta r\right)^2$ dentro de la evaluación en la posición $r+\Delta r$ entra simplemente como r^2.

NOTA: No es la única manera de manejar estos términos, pero tiene la ventaja de llevar directamente a una forma fácil de resolver de la ecuación diferencial. Algo similar ocurre en algunos casos de coordenadas cilíndricas, donde r aparece a la primera potencia.

Acomodar de acuerdo a la definición de la derivada y tomar el límite $\Delta r \to 0$ para obtener la ecuación diferencial:

RESPUESTA: $-\dfrac{1}{r^2}\dfrac{d}{dr}\left(r^2 q_r\right) + G_0 = 0$

Sección 4 – Sustitución de la ley de Fourier de la conducción

De la ley de Fourier de la conducción, en coordenadas esféricas, sustituir q_r en la ecuación anterior y simplificar (la conductividad térmica es constante):

RESPUESTA: $\dfrac{k}{r^2}\dfrac{d}{dr}\left[r^2 \dfrac{dT}{dr}\right] + G_0 = 0$

Sección 5 – Solución de la ecuación diferencial

Resolver la ecuación diferencial para llegar a la solución general:

RESPUESTA: $T = -\frac{G_0}{6k} r^2 - \frac{C_1}{r} + C_2$

Sección 6 – Condiciones de frontera

A continuación, se muestran las condiciones de frontera para el caso analizado. Explicar el por qué de cada una.

CONDICIÓN DE FRONTERA	EXPLICACIÓN
1. $\frac{dT}{dr} = 0$ en $r = 0$	
2. $T = T_s$ en $r = R$	

Sección 7 – Perfil de temperatura

La condición de frontera 1 no se puede sustituir directamente en la solución general, porque es para la derivada de la temperatura (dT/dr). Por esta razón, sería necesario primero derivar esta solución general. Afortunadamente, en este caso la derivada ya se había encontrado como parte del procedimiento de solución (sección 5):

$$\frac{dT}{dr} = -\frac{G_0}{3k}r - \frac{C_1}{r^2}$$

La condición de frontera 1 se debe utilizar con esta derivada para encontrar el valor de C_1. Nótese que, en este caso, al sustituir directamente la condición de frontera, se tendría división entre cero, por lo que es conveniente primero despejar C_1 y luego sustituir los valores:

RESPUESTA: $C_1 = 0$

NOTA: En muchos libros de transferencia de calor, en vez de despejar y sustituir, simplemente argumentan que el único valor posible para C_1 es cero, de tal forma que se evite la división entre cero. Este argumento también se puede aplicar directamente en la solución general para T, donde aparece el término C_1/r que se volvería infinito cuando $r = 0$, y la única manera de evitarlo es que C_1 sea cero.

Sustituyendo $C_1 = 0$ en la solución general, se llega a una nueva solución general:

$$T = -\frac{G_0}{6k}r^2 + C_2$$

Ahora se sustituye la segunda condición de frontera en la nueva solución general, y se despeja C_2:

RESPUESTA: $C_2 = T_s + \frac{G_0}{6k}R^2$

Esta constante C_2 se sustituye en la solución general, para llegar al perfil de temperatura que se busca:

RESPUESTA: $T = T_s + \frac{G_0}{6k}\left(R^2 - r^2\right)$

Sección 8 – Temperatura máxima

De acuerdo al criterio de máximos y mínimos, del cálculo diferencial, la temperatura máxima se encuentra donde $dT / dr = 0$. Formalmente, para encontrar la temperatura máxima, hay que tomar el perfil de temperatura, derivar con respecto a r, y despejar r para saber **dónde está la temperatura máxima**. Luego ese valor de r se sustituye en el perfil de temperatura para saber **el valor de la temperatura máxima**. En algunos casos simples, la temperatura máxima puede encontrarse también por simple inspección. En este caso, ¿cuál es la temperatura máxima?

RESPUESTA: $T_{\max} = T_s + \frac{G_0 R^2}{6k}$

Sección 9 – Temperatura promedio

La temperatura promedio en la esfera se obtiene multiplicando el perfil de temperatura por el diferencial de volumen en coordenadas esféricas, $dV = r dr d\theta d\phi$, integrando sobre toda la esfera, y dividiendo entre la integral de dV en la misma esfera. Formalmente:

$$\overline{T} = \frac{\int_{\phi=0}^{2\pi}\int_{\theta=0}^{\pi}\int_{r=0}^{R} T \cdot r^2 \operatorname{sen}\theta\, dr d\theta d\phi}{\int_{\phi=0}^{2\pi}\int_{\theta=0}^{\pi}\int_{r=0}^{R} r^2 \operatorname{sen}\theta\, dr d\theta d\phi}$$

La integral del denominador es simplemente el volumen de la esfera, $\frac{4}{3}\pi R^3$, así que:

$$\overline{T} = \frac{\int_{\phi=0}^{2\pi}\int_{\theta=0}^{\pi}\int_{r=0}^{R} T \cdot r^2 \operatorname{sen}\theta\, dr d\theta d\phi}{\frac{4}{3}\pi R^3}$$

Ninguno de los integrandos depende de ϕ, por lo que esa integración puede realizarse primero de forma independiente y la única función de θ a integrar es el seno, por lo que esa integral también se puede realizar por separado:

$$\int_0^{2\pi} d\phi = \phi\Big|_0^{2\pi} = 2\pi \qquad\qquad \int_0^{\pi} \operatorname{sen}\theta\, d\theta = -\cos\theta\Big|_0^{\pi} = 2$$

Sustituyendo estos resultados, se tiene: $\overline{T} = \dfrac{4\pi\int_0^R T \cdot r^2 dr}{\frac{4}{3}\pi R^3}$ que se puede simplificar a: $\overline{T} = \dfrac{3}{R^3}\int_0^R T \cdot r^2 dr$.

En esta última ecuación, sustituir el perfil de temperatura obtenido en la sección anterior, integrar y simplificar para encontrar la temperatura media de la esfera:

RESPUESTA: $\overline{T} = T_s + \dfrac{G_0 R^2}{15k}$

Sección 10 – Densidad de flujo de calor y calor total emitido

La densidad de flujo de calor q_r se obtiene a partir de la ley de Fourier de la conducción: $q_r = -k\left(dT\ /\ dr\right)$. El procedimiento formal es tomar el perfil de temperatura (que se obtuvo en la sección 6), derivar con respecto a r y sustituir esta derivada en la ley de Fourier.

SUGERENCIA: En ocasiones, ya se cuenta con la derivada $dT\ /\ dr$, obtenida durante la solución de la ecuación diferencial (sección 5).

RESPUESTA: $q_r = \frac{1}{3} G_0 r$

Esta densidad de flujo de calor, que depende de r, indica cuánta energía está pasando a través de una capa de la esfera a cualquier distancia r del centro. Para saber cuánto calor emite la esfera, primero es necesario evaluar q_r **en la superficie** de la esfera, es decir en $r = R$:

$$q_r = \tfrac{1}{3} G_0 r \qquad \rightarrow \qquad q_r\big|_{r=R} = \tfrac{1}{3} G_0 R$$

Al multiplicar $q_r\big|_{r=R}$ por el área total de la esfera se obtiene la rapidez total con la que la esfera está emitiendo calor:

RESPUESTA: $Q = \frac{4}{3}\pi R^3 G_0$

INSTITUTO TECNOLÓGICO
DE DURANGO

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS
QUÍMICA Y BIOQUÍMICA

Balance de Momentum, Calor y Masa
QI1720 ★ Ingeniería Química
Docente: Dr. Carlos Francisco Cruz Fierro

ACTIVIDAD 4
(6 puntos)

UNA DEMOSTRACIÓN DE LA LEY DE NEWTON DEL ENFRIAMIENTO

PARA REALIZARSE EN CASA

INTEGRANTES DEL EQUIPO (POR APELLIDO, EN ORDEN ALFABÉTICO, MÁXIMO TRES)	**NÚMERO DE CONTROL**

Intención didáctica

Comprobar experimentalmente la ley de Newton del enfriamiento, para un caso de convección libre y un caso de convección forzada.

Antecedentes

Cuando un objeto se encuentra a una temperatura diferente que el medio circundante, existe una transferencia de calor entre ellos. Newton estudió este fenómeno (aunque las teorías de la época sobre el calor y la temperatura aún no estaban bien establecidas), llegando a la conclusión de que la rapidez con la que disminuye la temperatura de un objeto caliente es proporcional a la diferencia de temperatura entre el objeto y los alrededores. En términos matemáticos:

$$-\frac{dT}{dt} = a\left(T - T_\infty\right) \tag{1}$$

donde T es la temperatura del objeto en cualquier tiempo t, T_∞ es la temperatura del medio ambiente, y a es una constante[‡] con unidades de (tiempo)$^{-1}$. Si la temperatura inicial del objeto (en $t = 0$) es T_0, la ecuación diferencial se puede resolver para obtener:

$$T = T_\infty + \left(T_0 - T_\infty\right)e^{-at} \tag{2}$$

Determinando la temperatura del objeto a diversos tiempos permite obtener una estimación de a. En esta versión de la actividad, que se ha simplificado para desarrollarse en casa sin necesidad de usar un térmometro, se obtendrá una estimación del valor de la constante a para convección libre y convección forzada, con base en la medición del tiempo que tarda un sistema en experimentar un cierto (aproximado) cambio de temperatura.

En esta actividad, el objeto será un recipiente (taza o vaso) inicialmente con agua hirviente. En una ocasión se dejará enfriar por convección libre, y en una segunda ocasión se enfriará por convección forzada. Al comenzar con agua hirviente, la temperatura inicial es conocida. La temperatura del medio ambiente se asumirá en 25 °C, y la temperatura final se asumirá a 60 °C, cuando se deja de apreciar el vapor del agua (la verdadera temperatura en la que esto ocurre depende de la temperatura y humedad del aire ambiente).

Materiales

- ★ Taza.
- ★ Cronómetro.
- ★ Agua hirviendo.

[‡] Es común que la constante sea k, pero en esta actividad se usa a para evitar confusión con la conductividad térmica.

Indicaciones

1. Calentar el agua hasta que esté en fuerte ebullición. A la presión atmosférica típica de la ciudad de Durango (0.8 bar), esto corresponde a una temperatura de ebullición de 94 °C.
2. Llenar la taza con el agua hirviendo, casi hasta el borde.
3. Colocar en un lugar donde no esté expuesta a corrientes de aire (convección libre) e iniciar el cronómetro.
4. Aproximadamente cada dos minutos, verificar si aún es visible el vapor sobre la taza. Ayuda usar un fondo oscuro para poderlo ver con más facilidad, y también soplar muy ligeramente para crear turbulencia. Si ya no es visible, detener el cronómetro y registrar el tiempo transcurrido en minutos.
5. Repetir desde el paso 1, pero en este caso crear convección forzada en el aire con un cartón o papel grueso. Verificar cada minuto si aún es visible el vapor.
6. De la ecuación (2), despejar a y calcular su valor para el caso de convección libre y el de convección forzada.

Medidas de seguridad

Tomar precauciones adecuadas para el manejo del agua hirviendo. No se recomienda usar vasos de vidrio, porque pueden romperse por la expansión térmica al entrar en contacto con el agua hirviendo.

Evidencias entregables

El reporte de esta actividad puede ser elaborado en computadora, y lleva esta hoja de indicaciones como portada. A continuación, pueden incluir una breve investigación bibliográfica opcional sobre la transferencia de calor por convección. Después, reportar el tiempo y su cálculo de a para cada caso, evidencia fotográfica del desarrollo de la actividad y la conclusión del equipo respecto a la actividad.

ACTIVIDAD 5

(20 puntos)

DIFUSIVIDAD A PARTIR DE LA EVAPORACIÓN DE UN LÍQUIDO EN UN CAPILAR

INTEGRANTES DEL EQUIPO (POR APELLIDO, EN ORDEN ALFABÉTICO, MÁXIMO CINCO)	**NÚMERO DE CONTROL**

Intención didáctica

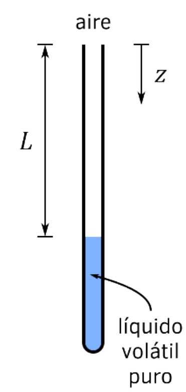
Realizar el análisis de la evaporación de un líquido en un capilar y aplicarlo para determinar experimentalmente la difusividad de un vapor en aire.

Evidencias entregables

La evidencia de esta actividad consta de este documento, con la sección 1 respondida, anexando sus cálculos detallados de la sección 4 y la evidencia fotográfica correspondiente.

Planteamiento del caso a analizar

Se tiene un tubo capilar parcialmente lleno con un líquido volátil, siendo L la longitud del capilar no ocupada por el líquido. Conforme se evapora, el nivel de líquido desciende. Aún cuando este sistema se encuentra (estrictamente hablando) en estado transitorio, el tiempo que tarda en cambiar el nivel del líquido es mucho mayor que el tiempo que tarda en formarse el perfil de concentración, lo que permite analizar el sistema como un **estado pseudo-estable:** primero se obtiene el perfil de concentración bajo la suposición de estado estable, y después se analiza cómo cambia el nivel del líquido al transcurrir el tiempo.



El sistema de coordenadas cilíndricas se ubicará en el extremo libre del capilar, con el eje z dirigido hacia abajo. El componente A es el vapor y el componente B es el aire. Las suposiciones necesarias para obtener el perfil de concentración son:

- ★ Estado estable.
- ★ La concentración de A varía en la dirección z.
- ★ No hay reacción química.
- ★ Difusión unimolecular (DUM): el vapor se está transfiriendo pero el aire no se transfiere.
- ★ Hay efectos de borde (el menisco curvo en la superficie del líquido y la difusión en la dirección radial cerca de la abertura del capilar) pero no se van a tomar en cuenta en el análisis.
- ★ La difusión ocurre en fase gaseosa, a temperatura y presión constantes, por lo que la difusividad es constante.

Sección 1 – Perfil de concentración en estado estable

A continuación se muestra la ecuación de conservación de un componente, en coordenadas cilíndricas, indicando los valores que se hacen cero con base en las suposiciones:

$$\cancel{\frac{\partial C_A}{\partial t}} + \left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\, \cancel{n_{A,r}}\right) + \frac{1}{r}\cancel{\frac{\partial n_{A,\theta}}{\partial \theta}} + \frac{\partial n_{A,z}}{\partial z} \right] - \cancel{r_A} = 0$$

En la ecuación diferencial resultante, como $n_{A,z}$ es la única variable dependiente, se puede resolver para tener:

$$\frac{dn_{A,z}}{dz} = 0 \quad \longrightarrow \quad n_{A,z} = C_1$$

Lo que indica que la densidad de flujo molar del componente A es la misma en cualquier parte del capilar.

A continuación, escribir la ecuación general de flujo, en coordenadas cilíndricas, componente z, y simplificar para el caso de difusión unimolecular.

Si bien este caso se puede analizar en términos de la concentración molar C_A, es conveniente hacer primero un cambio de variable a la fracción mol de A (y_A). Usando la relación $y_A = C_A / C$, donde C es la concentración molar total en la fase gaseosa ($C = P / RT$, que es constante para un gas isotérmico e isobárico), convertir la ecuación general de flujo a base fracción mol:

RESPUESTA: $n_{A,z} = \dfrac{-\mathscr{D}_{AB} P}{RT\left(1 - y_A\right)} \dfrac{dy_A}{dz}$

Dado que ya se había determinado que $n_{A,z} = C_1$, igualar con la ecuación anterior y resolver la ecuación diferencial:

RESPUESTA: $\ln(1 - y_A) = \dfrac{RTC_1}{\mathscr{D}_{AB} P} z + C_2$

A continuación se muestran las condiciones de frontera para este caso. Explicar el por qué de cada una.

CONDICIÓN DE FRONTERA	EXPLICACIÓN
1. $y_A = 0$ en $z = 0$	
2. $y_A = \dfrac{P_{vap}}{P}$ en $z = L$	

Aplicar las condiciones de frontera para encontrar las constantes C_1 y C_2.

Después de sustituir C_1 y C_2 en la solución general, hay que despejar y_A para llegar al perfil de concentración buscado. (puede ser útil aplicar la propiedad de los logaritmos $\ln a^b = b \ln a$).

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

Sección 2 – Densidad de flujo molar

Al principio del análisis, se había establecido que $n_{A,z} = C_1$, y esta constante se determinó en la página anterior:

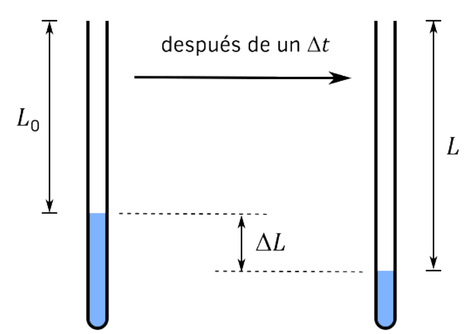
$$n_{A,z} = \frac{\mathscr{D}_{AB} P}{LRT} \ln \left(\frac{P - P_{vap}}{P} \right)$$

Es importante observar que la presión de vapor P_{vap} es menor que la presión total P (si no fuera así, el líquido estaría en ebullición), por lo que la división $\left(P - P_{vap}\right)/P$ siempre es un valor menor que 1. El logaritmo de un número menor que 1 siempre es un valor negativo. Todos los otros valores en esta expresión son constantes positivas ($\mathscr{D}_{AB}$, P, R, T y L), por lo que el resultado neto es que $n_{A,z}$ es un **valor negativo**.

La interpretación de que $n_{A,z}$ sea negativo es que el componente A se está moviendo **en dirección contraria** al eje z, lo cual es correcto, pues el eje z va hacia abajo, y el vapor se está difundiendo hacia arriba.

Sección 3 –Cambio de nivel del líquido en el capilar

Considérese que inicialmente (en tiempo $t = 0$), el espacio libre del capilar tenía una longitud inicial L_0. Después de que ha transcurrido un cierto intervalo de tiempo Δt, ese espacio libre tiene una nueva longitud L, por lo que hubo un cambio ΔL en la longitud.



Se plantea entonces un balance de masa para el componente A, en el que la cantidad de líquido que se evaporó es igual a la cantidad de vapor que salió del capilar debido a la difusión:

$$\left(\begin{array}{c} \text{masa del líquido} \\ \text{que se evaporó} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{masa del vapor que} \\ \text{salió del capilar} \end{array} \right)$$

La masa del líquido evaporado depende obviamente de ΔL. Multiplicado por el área de sección transversal A y por la densidad, se obtiene la masa en kg:

$$\underset{\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{\rho} \quad \underset{\text{m}^2}{A} \quad \underset{\text{m}}{\Delta L}$$

La masa de vapor que sale del capilar depende a su vez de la densidad de flujo molar $n_{A,z}$. Multiplicando por el peso molecular M, el área de sección transversal A y el intervalo de tiempo Δt se llega a la masa en kg:

$$\underset{\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2\cdot\text{s}}}{-n_{A,z}} \quad \underset{\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}}{M} \quad \underset{\text{m}^2}{A} \quad \underset{\text{s}}{\Delta t}$$

Obsérvese cómo se aplicó un signo negativo a $n_{A,z}$. Como se mencionó en la sección 2, el valor numérico de $n_{A,z}$ es negativo, y con este cambio de signo se hace positivo. Igualando las dos expresiones anteriores:

$$\rho A \Delta L = -n_{A,z} M A \Delta t$$

El área de sección transversal es la misma, por lo que se cancela. Reacomodando:

$$\frac{\Delta L}{\Delta t} = \frac{-n_{A,z} M}{\rho}$$

Tomando el límite cuando $\Delta t \to 0$, el cociente $\Delta L / \Delta t$ se convierte en la derivada de L con respecto al tiempo:

$$\frac{dL}{dt} = \frac{-n_{A,z} M}{\rho}$$

A continuación, se sustituye en esta ecuación la ecuación para $n_{A,z}$ que se obtuvo en la sección 2:

$$\frac{dL}{dt} = \frac{-\mathscr{D}_{AB} P M}{\rho L R T} \ln\left(\frac{P - P_{vap}}{P}\right)$$ y con las propiedades de los logaritmos: $$\frac{dL}{dt} = \frac{\mathscr{D}_{AB} P M}{\rho L R T} \ln\left(\frac{P}{P - P_{vap}}\right)$$

Nótese que en esta ecuación diferencial de primer orden, todo lo que aparece en el lado derecho de la ecuación es constante **excepto** la longitud L que aparece en el denominador. Reuniendo todas las constantes en una sola, la ecuación diferencial queda:

$$\frac{dL}{dt} = \frac{a}{L} \qquad \text{donde } a = \frac{\mathscr{D}_{AB} P M}{\rho R T} \ln\left(\frac{P}{P - P_{vap}}\right)$$

La ecuación diferencial puede ahora resolverse por separación de variables:

$$L\,dL = a\,dt$$

A partir de aquí se podría proceder de la manera habitual, integrando y usando la condición inicial para evaluar la constante de integración, pero en este caso es más directo si se integra con límites, donde el límite inferior corresponde al tiempo 0 en que la longitud es L_0 y el límite superior corresponde al tiempo t cuando la longitud es L:

$$\int_{L_0}^{L} L\,dL = a \int_0^t dt$$

Realizar la integración y reacomodar para llegar al resultado mostrado:

RESPUESTA: $L^2 - {L_0}^2 = \dfrac{2\mathscr{D}_{AB} PMt}{\rho RT} \ln\left(\dfrac{P}{P - P_{vap}}\right)$

Esta ecuación relaciona la longitud L del espacio libre del capilar con el tiempo t, junto con las demás propiedades. Una manera de aplicar esta ecuación podría ser puede despejar L para calcularla en función el tiempo. Otra opción, la que aplica en esta actividad, es despejar la difusividad $\mathscr{D}_{AB}$ y calcularla a partir de datos de L en función del tiempo.

Sección 4 –Medición experimental de la difusividad

4.1 Materiales

- ★ Un tubo capilar.
- ★ Plastilina.
- ★ Regla.
- ★ Cronómetro.
- ★ Termómetro.
- ★ Acetona.

4.2 Indicaciones

1. Inclinando el recipiente que contiene la acetona, introducir un extremo del tubo capilar y permitir que el líquido lo llene casi por completo, hasta aproximadamente 5 mm del borde.
2. Tapar el extremo libre con el dedo para que el líquido no escurra y sacar el capilar del líquido.
3. Sellar el otro extremo del capilar con plastilina, cuidando que no quede aire atrapado.
4. Con la regla, medir la longitud de la parte del capilar que **no** contiene líquido. Ésta es la longitud inicial L_0.
5. Colocar el capilar en posición vertical en un lugar donde no haya corrientes de aire. Colocar también el termómetro, para conocer la temperatura ambiente. Registrar la presión atmosférica e iniciar el cronómetro.
6. Al final de la clase, medir la longitud del capilar que **no** contiene líquido (L).
7. Utilizar estas mediciones, junto con la ecuación obtenida en la sección 3, para calcular la difusividad del vapor de acetona en aire, en cm²/s.

4.3 Consideraciones de seguridad y disposición de residuos

La acetona es un solvente volátil e inflamable, por lo que no debe haber flamas o chispas eléctricas en la cercanía. El volumen usado de acetona es muy pequeño, por lo que el capilar puede tratarse como residuo no peligroso.

4.4 Sugerencias para el éxito de la medición experimental

- ★ El capilar no se debe llenar completamente porque entonces la difusión ya no ocurre en una sola dirección y el modelo matemático no es aplicable (se vuelven importantes los efectos de borde).
- ★ El extremo sellado del capilar no debe contener burbujas, pues su expansión o contracción afecta la medición de la distancia L.

Datos adicionales de la acetona

ρ = 791 kg/m³ $\quad$ M = 58.08 g/mol $\quad$ $\log_{10} P_{vap} = 7.02447 - \dfrac{1161}{T + 224}$ $\quad$ (T en °C, P_{vap} en mmHg)

UNA DEMOSTRACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE MASA POR CONVECCIÓN

PARA REALIZARSE EN CASA

INTEGRANTES DEL EQUIPO (POR APELLIDO, EN ORDEN ALFABÉTICO, MÁXIMO CINCO)	**NÚMERO DE CONTROL**

Intención didáctica

Observar la transferencia de masa por convección, para un caso de convección forzada y para un caso de convección libre. Obtener una estimación del coeficiente de transferencia de masa para ambos casos.

Antecedentes

La densidad de flujo molar para el caso de transferencia de masa entre un objeto y un fluido (un líquido en este caso) está descrita por la ecuación de transferencia:

$$n_A = k_L\left(C_{A,s} - C_{A,\infty}\right)$$

donde n_A es la densidad de flujo molar del componente transferido, k_L es el coeficiente de transferencia de masa, $C_{A,s}$ es la concentración de A en la superficie del objeto y $C_{A,\infty}$ es la concentración de A en el fluido muy lejos del objeto. Esta ecuación es análoga a la ley de Newton del enfriamiento para la transferencia de calor por convección.

Cuando el fluido está en movimiento debido a la acción de algún agente externo, se dice que hay convección forzada. En cambio, si el fluido no está en movimiento, el componente A que se va transfiriendo por difusión al fluido causa una diferencia de densidades, que a su vez hace que el fluido se mueva por gravedad en la cercanía del objeto, teniendo entonces un caso de convección libre.

Para esta actividad, el objeto será un dulce de caramelo, por su facilidad de adquisición, y el fluido en el que ocurra la transferencia de masa será agua. El caramelo se asumirá compuesto exclusivamente de sacarosa (azúcar común, $C_{12}H_{22}O_{11}$)

Materiales

- ★ Pastillas y paletas de caramelo (de preferencia de color oscuro).
- ★ Una botella transparente (de un litro es adecuada).
- ★ Un vaso transparente (de preferencia alto).
- ★ Un pedazo de alambre (un par de plastinudos pueden funcionar adecuadamente).
- ★ Agua a temperatura ambiente.
- ★ Cronómetro o reloj.

Indicaciones – Convección forzada

1. Llenar la botella con agua hasta tres cuartas partes de su capacidad (para facilitar la agitación).
2. Introducir una de las pastillas de caramelo y tapar la botella. Iniciar el cronómetro.
3. Agitar suavemente la botella, volteándola rítmicamente de arriba abajo, aproximadamente cada dos segundos, hasta que se disuelva por completo el caramelo. Registrar el tiempo que se necesitó para la disolución.
4. Repetir desde el paso 1, pero en esta ocasión agitar vigorosamente la botella hasta que se disuelva el caramelo.

Indicaciones – Convección libre

1. Llenar el vaso con agua.
2. Amarrar una paleta de caramelo con el alambre, e introducirla en el vaso con el caramelo hacia abajo, doblando el alambre de tal forma que quede fija la paleta, de preferencia justo debajo de la superficie del agua (para que el azúcar disuelta se acumule en el fondo). Iniciar el cronómetro.
3. Observar el movimiento del agua, alrededor de la superficie de la paleta, conforme se va disolviendo.
4. Cuando se termine de disolver, detener el cronómetro.

Medidas de seguridad y manejo de residuos

No hay aspectos de seguridad particulares a observar. El agua con el azúcar disuelta es un residuo no peligroso que puede disponerse en el drenaje.

Recomendaciones para el éxito de la actividad

- ★ Elegir caramelos de forma geométrica simple, que permitan estimar su área con facilidad. Por ejemplo, las pastillas Halls, por su forma cuadrada, son convenientes para este propósito. Además, su área varía menos conforme se disuelven, comparada por ejemplo con los caramelos de forma aproximadamente esférica.

- ★ En el caso de la convección libre, se les está recomendando usar una paleta de caramelo por la facilidad para sujetarla por el palito. Las paletas de caras planas probablemente mantengan también un área más consistente conforme se disuelven.

Indicaciones para el cálculo del coeficiente de transferencia de masa

Aún sin instrumentos de precisión para medir algunas cosas, y el hecho de que algunos parámetros varían conforme se realiza el experimento, sí es posible obtener una estimación de algunos de los valores necesarios para calcular el coeficiente de transferencia de masa.

La masa del caramelo se puede obtener del peso neto reportado y el número de piezas en el empaque. Con esa masa y el peso molecular de la sacarosa se puede obtener el número de moles transferidos. Ese número de moles, dividido entre el área y el tiempo, da la densidad de flujo molar n_A.

Por otro lado, para la concentración de la superficie $C_{A,s}$, hay que recordar que en una interfase sólido-líquido donde el sólido es soluble hay condiciones de equilibrio, por lo que $C_{A,s}$ corresponde a la concentración de una solución saturada de sucrosa, es decir, su solubilidad (que pueden encontrar en alguna referencia bibliográfica confiable).

Finalmente, para la concentración en el líquido $C_{A,\infty}$ hay que considerar que los dos experimentos tienen situaciones diferentes: para la convección forzada el agua se está agitando, así que la concentración va a ir variando desde cero hasta la concentración con el azúcar de la pastilla disuelta en el agua (que se puede calcular). En este caso, tomar para $C_{A,\infty}$ la mitad de esa concentración (como una concentración “promedio” durante el experimento). En cambio, para el caso de convección libre, el agua con el azúcar disuelta tiende a acumularse en el fondo, y es agua esencialmente libre de azúcar la que está en contacto con la paleta, por lo que se puede tomar $C_{A,\infty}$ como cero.

Con esta información, el coeficiente de transferencia se obtiene simplemente por despeje de la ecuación presentada en la primera página. Calcular k_L (en m/s) para cada uno de los casos de convección forzada y para el caso de convección libre, y compararlos entre sí.

Evidencias entregables

La evidencia de esta actividad consta de este documento cumpliendo las funciones de portada, evidencia fotográfica de sus experimentos, los cálculos para el coeficiente de transferencia de masa, y sus conclusiones individuales sobre la actividad. Una vez completado el documento, realizar su entrega a través de la plataforma del curso.