



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

Table with 2 columns: INTEGRANTES DEL EQUIPO (POR APELLIDO, EN ORDEN ALFABÉTICO, MÁXIMO CINCO) and NÚMERO DE CONTROL. It contains five empty rows for data entry.

Intención didáctica

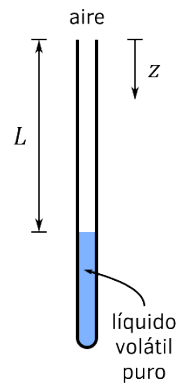
Realizar el análisis de la evaporación de un líquido en un capilar y aplicarlo para determinar experimentalmente la difusividad de un vapor en aire.

Evidencias entregables

La evidencia de esta actividad consta de este documento, con la sección 1 respondida, anexando sus cálculos de la sección 4 y la evidencia fotográfica correspondiente. Una vez completado el documento, cada integrante del equipo debe indicar su entrega a través de la plataforma.

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:

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

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

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

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:  $n_{A,z} = \frac{-D_{AB} P}{RT(1 - y_A)} \frac{dy_A}{dz}$



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

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

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

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:

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

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  $(P - P_{vap}) / P$  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 ( $D_{AB}$ ,  $P$ ,  $R$ ,  $T$  y  $L$ ), por lo que el resultado neto es que  $n_{A,z}$  es un valor negativo.

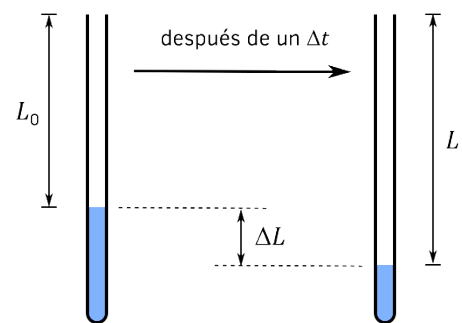
La interpretación de que  $n_{A,z}$  sea negativo es que el componente A se está moviendo en dirección contraria al eje  $z$ , lo cual es correcto, pues el eje  $z$  va hacia abajo, y el vapor se está difundiendo hacia arriba.

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  $\Delta t$ , ese espacio libre tiene una nueva longitud  $L$ , por lo que hubo un cambio  $\Delta L$  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:

$$\left( \text{masa del líquido} \right)_{\text{que se evaporó}} = \left( \text{masa del vapor que} \right)_{\text{salió del capilar}}$$





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

$$\rho \quad A \quad \Delta L$$

$$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{m}^2 \quad \text{m}$$

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  $\Delta t$  se llega a la masa en kg:

$$-n_{A,z} \quad M \quad A \quad \Delta t$$

$$\frac{\text{kmol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \quad \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \quad \text{m}^2 \quad \text{s}$$

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  $\Delta t \rightarrow 0$ , 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:

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

Nótese que, en el lado derecho de la ecuación, todo es constante excepto la longitud  $L$  que aparece en el denominador. Definiendo esta constante como  $a$ , la ecuación diferencial queda:

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

Separando variables se tiene:

$$L dL = a dt$$

Esta ecuación diferencial se podría resolver de la manera habitual, integrando y usando la condición inicial para evaluar la constante, pero es más fácil y conveniente si se integra con límites, donde el límite inferior indica que la longitud es  $L_0$  en el tiempo 0, y es  $L$  en el tiempo  $t$ :

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



$$\frac{L^2}{2} \Big|_{L_0}^L = at \Big|_0^t \longrightarrow \frac{L^2}{2} - \frac{L_0^2}{2} = at \longrightarrow L^2 - L_0^2 = 2at$$

Finalmente, sustituyendo la constante  $a$  :

$$L^2 - L_0^2 = \frac{2\mathcal{D}_{AB}P Mt}{\rho RT} \ln\left(\frac{P}{P - P_{vap}}\right)$$

Esta ecuación establece la relación de la longitud  $L$  del espacio libre del capilar con el tiempo  $t$ , junto con las demás propiedades del sistema. Una manera de aplicar esta ecuación podría ser puede despejar  $L$  para calcularla en función el tiempo. Otra aplicación, la que interesa en esta actividad, es utilizarla con datos de  $L$  en función del tiempo para medir la difusividad  $\mathcal{D}_{AB}$ .

#### 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 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  $\text{cm}^2/\text{s}$ .

##### 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 Datos adicionales de la acetona

$$\rho = 791 \text{ kg/m}^3 \quad M = 58.08 \text{ g/mol} \quad \log_{10} P_{vap} = 7.02447 - \frac{1161}{T + 224} \quad (T \text{ en } ^\circ\text{C}, P_{vap} \text{ en mmHg})$$



---

---

**DEMOSTRACIÓN [CASERA] DE LA TRANSFERENCIA DE MASA POR CONVECCIÓN**

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:

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

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).

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.



---

---

### INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE ADSORCIÓN

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

#### **Intención didáctica**

Familiarizarse con los principales conceptos relacionados con la adsorción.

#### **Indicaciones**

1. Realizar una lectura de comprensión de las siguientes secciones del libro de Treybal, "Operaciones de Transferencia de Masa", 2ª edición, McGraw-Hill:
  - a. Tipos de adsorción y Naturaleza de los adsorbentes (pp. 626–629).
  - b. Equilibrios de adsorción (pp. 629–634, excepto "Histéresis de adsorción").
  - c. Operaciones por etapas (pp. 646–656, excepto las secciones "Aplicación de la ecuación de Freundlich").
  - d. Adsorbentes de lecho fijo de estado no estacionario (pp. 687–689).
2. Elaborar una síntesis de los conceptos principales, con base principalmente en esta referencia bibliográfica, pero complementando con fuentes bibliográficas adicionales. Pueden incluir las figuras que consideren necesarias para su explicación, pero deben hacer referencia a ellas en el texto antes de que aparezcan.

#### **Evidencias entregables**

La evidencia de esta actividad tiene una extensión máxima recomendada de 8 páginas, y consta de este documento cumpliendo las funciones de portada, seguida de su síntesis del material, y sus conclusiones individuales sobre la importancia de la adsorción. Una vez completado el documento, realizar su entrega a través de la plataforma del curso.

Su comprensión de este material, específicamente de los puntos 1.a y 1.b de las indicaciones, es sujeto a evaluación en cuestionario.