

# Fenómenos de transporte – Preguntas C.2

**Profesor:** Christian Hernández Osorio

**Ayudante:** Deyanira Carrillo Suazo

## 1.- ¿Qué es la difusión?

La difusión es un mecanismo de transporte de masa dentro de un sistema, el cual es provocado por un gradiente de concentración.

## 2.- ¿Por qué se transfiere masa por difusión?

Se transfiere masa por difusión para minimizar la energía libre del sistema y lograr la distribución homogénea de la especie que se difunde en el sistema.

## 3.- ¿Por qué es necesario especificar una velocidad de referencia al dar datos de velocidad de difusión?

Esto es dado a que la velocidad de referencia media mísica y molar pueden ser diferentes incluso en difusión dado que éstas se obtienen considerando distintas cualidades de la sustancia como lo son la fracción en masa y fracción en peso.

## 4.- ¿Cuáles son las dimensiones y el significado físico de $D_{ab}$ , $\nu$ y $\alpha$ ?

- Difusividad térmica:  $a = \frac{k}{\rho c_p} \Rightarrow a [=] \frac{\frac{cal}{g \cdot cal}}{\frac{cm^3}{cm^3} \cdot \frac{g \cdot K}{g \cdot K}} = \frac{cm^2}{s}$
- Viscosidad cinemática:  $\nu = \frac{\mu}{\rho} \Rightarrow \nu [=] \frac{\frac{g}{cm \cdot s}}{\frac{g}{cm^3}} = \frac{cm^2}{s}$
- Coeficiente de difusión:  $D_{ab} = \frac{cm^2}{s}$

Los tres conceptos son análogos entre sí, pues una medida de la rapidez con la que se propaga el calor, momentum y la masa (respectivamente) al interior del sistema del transporte o rapidez del sistema para llegar al equilibrio.

## 5.- ¿Qué significa que $D_{AB}$ y $D_{BA}$ tengan el mismo valor?

Esto quiere decir que la transferencia de masa en un proceso de difusión binaria ocurre en ambos sentidos al mismo tiempo, esto tiene sentido ya que el espacio que desocupa una especie A que difunde en un medio B es ocupado por esta última especie para mantener la continuidad de la fase.

## 6.- ¿De qué dependerá el flujo difusivo de una especie, por ejemplo, de A en B, cuando en un sistema no existen gradientes de concentración?

Se tiene que el flujo difusivo consta de dos partes, flujo por convección y flujo por difusión. Al no haber gradientes de concentración, se considera que no hay flujo por difusión, por lo tanto, este flujo difusivo solo dependerá de la parte convectiva, la cual podría ser causada por ejemplo por gradientes de temperatura (difusión térmica), gradientes de fuerzas (difusión forzada), etc.

Con esto en mente, para conocer el valor de este flujo difusivo, necesitaremos saber la fracción molar de cada especie, así como los moles totales de la mezcla.

**7.- Explique brevemente las analogías que existen entre las tres leyes de transporte.**

Considerando las 3 leyes de transporte se tienen:

- Ley de viscosidad de Newton: Transporte de momentum. ( $\tau_{yx} = -\mu \frac{dv_x}{dy}$ )
- Ley de Fourier: Transporte de energía en forma de calor. ( $q_y = -k \frac{dT}{dy}$ )
- Primera Ley de Fick: Transporte de materia. ( $mJ_A = -cD_{AB} \nabla x_A$ )

En sus tres respectivas ecuaciones coincide en que en el lado izquierdo hay un flux, lo que representan la forma en que se transportan sus correspondientes propiedades.

En las tres existe un signo negativo en el lado derecho de la ecuación, el cual establece la dirección correcta del flujo de tales propiedades.

El flujo de cada una de las propiedades depende de un gradiente, en donde si consideramos una concentración mísica de la mezcla como constante, se tendrá un gradiente de concentración de momentum, un gradiente de concentración de energía y un gradiente de concentración mísica, respectivamente a las leyes mencionadas.

También se puede notar que en los tres casos hay una constante de proporcionalidad, que tiene que ver con las características del medio en que se transporta la propiedad.

**8.- Describa los factores de los cuales depende el valor de la difusividad  $D_{ab}$  de un sistema.**

Se tiene que el valor de la difusividad  $D_{ab}$  de un sistema depende de:

- Presión: Con un aumento de la presión la difusividad disminuye, pues el movimiento libre de A en B se complica.
- Temperatura: con P y V ctes, el aumento de la temperatura implica que las partículas adquieran mayor energía interna, por lo que mueven más rápido, lo que nos dice que la difusividad aumenta con la temperatura.
- Composición: mientras mayor concentración de partículas que impidan el camino libre de la otra, menor será el valor de difusividad.
- Naturaleza de las especies: Si la naturaleza de estas especies nos indica que van a interactuar, entre más haya de esa especie que provoca la interacción, menor es la difusividad. Si ésta especie es menor, la difusividad aumentará.

Ejercicios:

**Problema 1:** Determinar el valor de la difusividad  $D_{AB}$ , del sistema  $CO_2 - N_2$  a  $50^\circ C$  y 2 atm de presión por los siguientes métodos:

- A partir de sus propiedades críticas
- Utilizando la ecuación de Chapman-Enskog

**Nota:** Ambos gases pueden ser considerados como no polares.

Respuesta:

Datos que nos da el problema:

- Sistema  $CO_2 - N_2$
- $T = 50^\circ C = 323 K$
- $P = 2 \text{ atm}$

Especies: A:  $CO_2$ , B:  $N_2$

- a) Como estos gases son no polares, podemos usar las propiedades críticas con valores:

$$a = 2.745 \times 10^{-4}$$

$$b = 1.823$$

Combinando la teoría cinética y de los estados correspondientes se obtuvo la siguiente ecuación para estimar  $D_{AB}$  de gases a bajas presiones:

$$\frac{pD_{AB}}{(p_{c_A}p_{c_B})^3(T_{c_A}T_{c_B})^{1/2}\left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}\right)^{1/2}} = a\left(\frac{T}{\sqrt[T]{T_{c_A}T_{c_B}}}\right)^b$$

Error : 8%  
p = 1 atm

$$D_{AB} [=] \text{cm}^2/\text{s} \quad p [=] \text{atm} \quad T [=] \text{K}$$

Para mezclas binarias de gases no polares:

$$a = 2.745 \times 10^{-4}$$
$$b = 1.823$$

Para  $H_2O$  con un gas no polar:

$$a = 3.640 \times 10^{-4}$$
$$b = 2.334$$

Así, los valores críticos (según las tablas) quedan:

$$P_{c_A} = 73.8 \text{ atm} \quad ; \quad P_{c_B} = 33.9 \text{ atm}$$

$$T_{c_A} = 304.1 \text{ K} \quad ; \quad T_{c_B} = 126.2 \text{ K}$$

$$M_A = 44.0 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \quad ; \quad M_B = 28.0 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

Así, usando la teoría cinética y de los estados correspondientes se tiene la ecuación:

$$\frac{P * D_{AB}}{(P_{C_A} * P_{C_B})^{\frac{1}{3}} * (T_{C_A} * T_{C_B})^{\frac{5}{12}} * \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}\right)^{\frac{1}{2}}} = a = \left(\frac{T}{\sqrt{T_{C_A} * T_{C_B}}}\right)^b$$

$$\rightarrow \frac{2.0 * D_{AB}}{(73.8 * 33.9)^{\frac{1}{3}} * (304.1 * 126.2)^{\frac{5}{12}} * \left(\frac{1}{44.0} + \frac{1}{28.0}\right)^{\frac{1}{2}}} = 2.745 * 10^{-4} * \left(\frac{323}{\sqrt{304.1 * 126.2}}\right)^{1.823}$$

$$\rightarrow \frac{2.0 * D_{AB}}{264.94} = 6.83 * 10^{-4}$$

$$\rightarrow D_{AB} = 0.09 \frac{cm^2}{s}$$

b) De los datos de las tablas se tiene:

$$\sigma_A = 3.941 \text{ \AA} \quad ; \quad \sigma_B = 3.798 \text{ \AA}$$

$$\sigma_{AB} = \frac{1}{2}(\sigma_A + \sigma_B) = \frac{1}{2}(3.941 + 3.798) = 3.870 \text{ \AA} \text{ (promedio)}$$

$$\frac{\varepsilon}{k} A = 195.2 \text{ K} \quad ; \quad \frac{\varepsilon}{k} B = 71.4 \text{ K}$$

$$\frac{\varepsilon}{k} AB = \sqrt{\frac{\varepsilon}{k} A * \frac{\varepsilon}{k} B} = 2.73 \approx 2.7$$

Con estos valor de  $T^* = 2.7$ , en las tablas se tiene que  $\Omega_{D_{AB}} = 0.9781$

Así, con estos datos usamos la ecuación de Chapman-Enskog:

$$D_{AB} = 0.0018583 * \frac{\sqrt{T^3 * \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}\right)}}{P * \sigma_{AB}^2 * \Omega_{D_{AB}}}$$

$$\rightarrow 0.0018583 * \frac{\sqrt{323^3 * \left(\frac{1}{44.0} + \frac{1}{28.0}\right)}}{2.0 * 3.870^2 * 0.9781}$$

$$\rightarrow D_{AB} = 0.089 \frac{cm^2}{s}$$

**Problema 2:** Estimar  $D_{AB}$  para una solución acuosa diluida de ácido acético a 12.5 °C utilizando la ecuación de Wilke. La densidad de ácido acético a su temperatura normal de ebullición de  $0.937 \frac{g}{cm^3}$ , compare su resultado con el valor experimental a  $0.91 * 10^{-5} \frac{cm^2}{s}$ , considere que comportamiento del ácido acético es muy similar a la del benceno (solventes orgánicos).

Datos del problema:

Especies: A: Ácido acético; B:  $H_2O$

$$\rho_A = 0.937 \frac{g}{cm^3}; D_{AB}(\text{experimental}) = 0.91 * 10^{-5} \frac{cm^2}{s}$$

$$T = 12.5^\circ C = 285.5 K$$

$$M_A = 60.0 \frac{g}{mol}; M_B = 18.0 \frac{g}{mol}$$

Wilke desarrolló una correlación para coeficientes de difusión basada en la ecuación de Stokes-Einstein, para bajas concentraciones de A y B

$$D_{AB} = 7.4 \times 10^{-8} \frac{(\varphi_B M_B)^{1/2} T}{\mu \tilde{V}_A^{0.6}} \quad \text{Error: } \pm 10\%$$

$V_A$ : volumen molar del soluto A como líquido en su punto normal de ebullición [=]  $cm^3/mol$

$\mu$ : viscosidad de la mezcla [=] cP

$\varphi_B$ : parámetro de asociación para el solvente B  
(2.6  $H_2O$ , 1.9  $CH_3OH$ , 1.5  $C_2H_5OH$  y 1.0  $C_6H_6$ )

Supuestos:

$$\mu = \mu_{H_2O}(20^\circ C) = 1.0019 \text{ cp}$$

$$\varphi_B = \varphi_{H_2O} = 2.6$$

Solución:

$$\tilde{V}_A = \frac{M_A}{\rho_A} = \frac{60.0 \frac{g}{mol}}{0.937 \frac{g}{cm^3}} = 64.03 \frac{cm^3}{mol}$$

Así:

$$D_{AB} = \frac{7.4 * 10^{-8} (\varphi_B * M_B)^{1/2} * T}{\mu (\tilde{V}_A)^{0.6}} = \frac{7.4 * 10^{-8} (2.6 * 18)^{1/2} * 285.5}{1.0019 * (64.03)^{0.6}} = 1.18 * 10^{-5} \frac{cm^2}{s}$$

Comparando los valores de  $D_{AB} = 1.18 * 10^{-5} \frac{cm^2}{s}$  y el valor entregado en el enunciado  $D_{AB}(\text{experimental}) = 0.91 * 10^{-5} \frac{cm^2}{s}$  se puede ver que ambos valores son semejantes, por lo tanto, la estimación que se hizo es bastante buena.

**Problema 3: Deducir la expresión de  $n_i$  en términos del flujo difusivo y convectivo de la especie  $i$ .**

Solución:

$$mj_i = \rho_i(U_i - U^m)$$

$$\rightarrow mj_i = \rho_i U_i - \rho_i U^m$$

$$\rightarrow mj_i = \rho_i U_i - \rho_i \sum_{i=1}^n \omega_i U_i$$

$$\rightarrow mj_i = \rho_i U_i - \rho_i \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i}{\rho} U_i$$

$$\rightarrow mj_i = \rho_i U_i - \frac{\rho_i}{\rho} \sum_{i=1}^n \rho_i U_i$$

$$\rightarrow mj_i = \rho_i U_i - \omega_i n$$

$$\rightarrow mj_i = n_i - \omega_i n$$

$$\rightarrow n_i = mj_i + \omega_i n$$

Donde:

$n_i$  : Flux másico de la especie i.

$mj_i$  : Flux másico de la especie i, respecto de la velocidad másica de la mezcla (término difusivo)

$n$  : Flux másico total de la mezcla.

$\omega_i n$  : Flux másico de la especie i con respecto del flux másico total de la mezcla.

**Problema 4:** Demostrar que la suma de las densidades de flujo de  $MJ_i$  en un sistema binario es igual a cero.

$$MJ_A + MJ_B = 0$$

$$C_A(U_A - U^M) + C_B(U_B - U^M) = 0$$

$$C_A U_A - C_A U^M + C_B U_B - C_B U^M = 0$$

$$(C_A U_A + C_B U_B) - (C_A + C_B) U^M = 0$$

Sabiendo que  $\sum_{i=1}^n C_i U_i = N = C U^M$  y que  $C_A + C_B = C$ , entonces:

$$C U^M - C U^M = 0 \text{ (demostración)}$$

¡solo para sistemas binarios!

**Problema 5:** Una solución que contiene  $0.1 \times 10^{-3} m^3$  de metanol y  $0.9 \times 10^{-3} m^3$  de benceno se mueve a una velocidad media molar de  $0.12 \frac{m}{s}$ . Si el flujo molar de benceno relativo a la velocidad media de masa es  $1.0 \frac{kmol}{m^2 s}$ , ¿Cuál es el flujo molar total de metanol,  $N_A$  y la velocidad media de masa?

Metanol (A)	Benceno (B)
$M_A = 32.04 \frac{kg}{kmol}$	$M_B = 78.12 \frac{kg}{kmol}$
$\rho_A = 792 \frac{kg}{m^3}$	$\rho_B = 879 \frac{kg}{m^3}$

Solución:

Suponiendo que el metanol y el benceno forman soluciones ideales o perfectas:

$$V_{mezcla} = V_{metanol} + V_{benceno}$$

$$V_{mezcla} = 0.1 \times 10^{-3} m^3 + 0.9 \times 10^{-3} m^3$$

$$V_{mezcla} = 1 \times 10^{-3} m^3$$

$$m_i = \rho_i V_i ; n_i = \frac{m_i}{M_i} \text{ y } C_i = \frac{n_i}{V_{mezcla}}$$

Para el metanol:

$$m_A = \rho_A V_A$$

$$m_A = 792 \frac{kg}{m^3} * 0.1 \times 10^{-3} m^3 = 0.0792 kg$$

$$n_A = \frac{0.0792 kg}{32.04 \frac{kg}{kmol}}$$

$$n_A = 0.00247 kmol$$

$$C_A = \frac{0.00247 kmol}{1 \times 10^{-3} m^3} = 2.47 \frac{kmol}{m^3}$$

Para el benceno

$$m_B = \rho_B V_B$$

$$m_B = 879 \frac{kg}{m^3} * 0.9 \times 10^{-3} m^3 = 0.7911 kg$$

$$n_B = \frac{0.7911 kg}{78.12 \frac{kg}{kmol}}$$

$$n_B = 0.0101 kmol$$

$$C_B = \frac{0.0101 kmol}{1 \times 10^{-3} m^3} = 10.12 \frac{kmol}{m^3}$$

De las relaciones fundamentales se sabe que:

$$MJ_B = \frac{M}{M_A} mJ_A \text{ (columna de relaciones entre flux másicos y molares)}$$

$$\Sigma M = X_A M_A + X_B M_B$$

$$C_{mezcla} = 2.47 \frac{kmol}{m^3} + 10.12 \frac{kmol}{m^3} = 12.59 \frac{kmol}{m^3}$$

$$X_A = \frac{2.47 \frac{kmol}{m^3}}{12.59 \frac{kmol}{m^3}} = 0.196; X_B = \frac{10.12 \frac{kmol}{m^3}}{12.59 \frac{kmol}{m^3}} = 0.804$$

Reemplazamos los datos en la formula principal  $M = X_A M_A + X_B M_B$  y luego utilizamos la relación  $mJ_B = \frac{M}{M_A} MJ_B$

$$M = 0.196 \left( 32.04 \frac{kg}{kmol} \right) + 0.804 \left( 78.12 \frac{kg}{kmol} \right)$$

$$M = 6.2798 + 62.808 = 69.09 \frac{kg}{kmol}$$

$$MJ_B = \frac{69.09 \frac{kg}{kmol}}{32.04 \frac{kg}{kmol}} * \left( -1.0 \frac{kmol}{m^2 s} \right) = -2.156 \frac{kmol}{m^2 s} \text{ (signo indica dirección)}$$

Sabiendo que para un sistema binario:

$$MJ_A + MJ_B = 0 ; MJ_A = 2.156 \frac{kmol}{m^2 s}$$

Utilizando la siguiente relación calculamos  $N_A$

$$MJ_A = C_A(U_A - U^m)$$

$$U_A = \frac{MJ_A}{C_A} + U^m = \frac{2.1516 \frac{kmol}{m^2 s}}{2.47 \frac{kmol}{m^3}} + 0.12 \frac{m}{s} = 0.99 \frac{m}{s}$$

$$N_A = C_A U_A = 2.47 \frac{kmol}{m^3} * \left( 0.99 \frac{m}{s} \right) = 2.45 \frac{kmol}{m^2}$$

Luego calculamos  $U_B$

Sabiendo que:  $U^M = X_A U_A + X_B U_B$

$$U_B = \frac{U^M - X_A U_A}{X_B} = \frac{0.12 \frac{m}{s} - 0.196(0.99) \frac{m}{s}}{0.804} = -0.092 \frac{m}{s}$$

Y de los datos  $mJ_B = -1.0 \frac{kmol}{m^2 s}$  de la definición de flux molar:

$$mJ_B = C_B(U_B - U_A)$$

$$U^m = U_B - \frac{mJ_B}{C_B} = -0.092 - \frac{-1.0 \frac{kmol}{m^2 s}}{10.12 \frac{kmol}{m^3}}$$

$$U^m = -0.092 + 0.0988 = 0.0068 \frac{m}{s}$$

**Problema 5:** Determine la conductividad calorífica de la mezcla gaseosa que se describe a continuación a 25°C y 1 atm de presión.

Gas	Fracción molar	Calor específico másico (J/kg*K)
Butano (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	0.512	2514
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	0.378	-
Helio (He)	0.110	-

Considera las siguientes relaciones y valores:

$$C_p - C_v = R \text{ (gas ideal)}$$

$$R = 8.314 \frac{J}{mol * K}$$

$$R = 1.987 \frac{cal}{mol * K}$$

Solución:

Datos del problema:

$$\begin{aligned} T &= 25^\circ C = 298 K \\ P &= 1.0 \text{ atm} \end{aligned}$$

Primero se calcula la viscosidad, seguido de la conductividad calorífica de cada sustancia gaseosa:

- **C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>:**

Datos de tabla:  $M = 58.124 \frac{g}{mol}$ ;  $\sigma = 4.687 \text{ \AA}$ ;  $\frac{\varepsilon}{K} = 531.4 \text{ K}$

$$C_p(\text{másico}) = 2514 \frac{J}{kg * K} \text{ (dato del problema)}$$

Calculando  $T^*$

$$T^* = \frac{T}{\frac{\varepsilon}{K}} = \frac{298 \text{ K}}{531.4 \text{ K}} = 0.56 \approx 0.55 \text{ (también vale interpolar)}$$

Viendo la tabla de  $T^*$  con valor 0.55 llegamos a un valor:  $\Omega\mu = 2.1781$

Luego, calculamos la viscosidad por Chapman-Enskog se tiene:

$$\mu = 2.6693 * 10^{-5} \frac{\sqrt{M * T}}{\sigma^2 * \Omega\mu} = 2.6693 * 10^{-5} \frac{\sqrt{28.124 * 298}}{4.687^2 * 2.1781} = 7.34 * 10^{-5} \frac{g}{cm * s} \text{ (poise)}$$

Antes de calcular la conductividad calorífica se homogeneizan las unidades de  $C_p$ :

$$C_p(\text{másico}) = 2514 \frac{J}{kg * K} * \frac{1 \text{ cal}}{4.186 J} * \frac{1kg}{1000g} = 0.6 \frac{\text{cal}}{g * K}$$

Ahora, calculando la conductividad calorífica para gases poliatómicos a baja densidad se usa el método de Eucken:

$$k = \left( C_P(\text{másico}) + \frac{5}{4} * \frac{R}{M} \right) * \mu = \left( 0.6 \frac{\text{cal}}{g * K} + \frac{5}{4} * \frac{1.987 \frac{\text{cal}}{\text{mol} * K}}{58.124 \frac{g}{\text{mol}}} \right) * 7.34 * 10^{-5} \frac{g}{cm * s}$$

$$k = 4.72 * 10^{-5} \frac{\text{cal}}{cm * s * K}$$

- $O_2$ :

Datos de tabla:  $M = 31.999 \frac{g}{mol}$ ;  $\sigma = 3.467 \text{ \AA}$ ;  $\frac{\varepsilon}{K} = 106.7 K$

Calculando  $T^*$

$$T^* = \frac{T}{\frac{\varepsilon}{K}} = \frac{298 K}{106.7 K} = 2.79 \approx 2.8 \text{ (también vale interpolar)}$$

Viendo la tabla de  $T^*$  con valor 2.8 llegamos a un valor:  $\Omega\mu = 1.0591$

Luego, calculamos la viscosidad por Chapman-Enskog se tiene:

$$\mu = 2.6693 * 10^{-5} \frac{\sqrt{M * T}}{\sigma^2 * \Omega\mu} = 2.6693 * 10^{-5} \frac{\sqrt{31.999 * 298}}{3.467^2 * 1.0591} = 2.05 * 10^{-4} \frac{g}{cm * s} \text{ (poise)}$$

Como no nos dan  $C_p$  para el oxígeno, y considerando que es un gas diatómico se tiene:

$$C_p(\text{molar}) = \frac{7}{2} * R = \frac{7}{2} * 1.987 \frac{\text{cal}}{\text{mol} * K} = 6.95 \frac{\text{cal}}{\text{mol} * K}$$

Como necesitamos un  $C_p(\text{másico})$ , transformamos el  $C_p(\text{molar})$ :

$$C_p(\text{másico}) = \frac{C_p(\text{molar})}{M} = \frac{6.95 \frac{\text{cal}}{\text{mol} * K}}{31.999 \frac{g}{mol}} = 0.217 \frac{\text{cal}}{g * K}$$

Ahora, calculando la conductividad calorífica para gases poliatómicos a baja densidad se usa el método de Eucken:

$$k = \left( C_P(\text{másico}) + \frac{5}{4} * \frac{R}{M} \right) * \mu = \left( 0.217 \frac{\text{cal}}{g * K} + \frac{5}{4} * \frac{1.987 \frac{\text{cal}}{\text{mol} * K}}{31.999 \frac{g}{mol}} \right) * 2.05 * 10^{-4} \frac{g}{cm * s}$$

$$k = 6.04 * 10^{-5} \frac{\text{cal}}{cm * s * K}$$

- He:

Datos de tabla:  $M = 4.003 \frac{g}{mol}$ ;  $\sigma = 2.551 \text{ \AA}$ ;  $\frac{\epsilon}{K} = 10.22 K$

Calculando  $T^*$

$$T^* = \frac{T}{\frac{\epsilon}{K}} = \frac{298 K}{10.22 K} = 29.16$$

Como el valor de  $T^*$  está entre 25 y 30 en la tabla, hay que interpolar para encontrar  $\Omega\mu$ :

$$\Omega\mu = \Omega_2 - (T_2^* - T^*) \left( \frac{\Omega_2 - \Omega_1}{T_2^* - T_1^*} \right) = 0.7003 - (30 - 29.16) \left( \frac{0.7003 - 0.7196}{30 - 25} \right) = 0.7035$$

$$\Omega\mu = 0.7035$$

Luego, calculamos la viscosidad por Chapman-Enskog se tiene:

$$\mu = 2.6693 * 10^{-5} \frac{\sqrt{M * T}}{\sigma^2 * \Omega\mu} = 2.6693 * 10^{-5} \frac{\sqrt{4.003 * 298}}{2.551^2 * 0.7035} = 2.01 * 10^{-4} \frac{g}{cm * s} (\text{poise})$$

Como el He es un gas monoatómico, se puede usar la formula de Chapman-Enskog para calcular la conductividad calorífica de la siguiente manera:

$$k = 1.9891 * 10^{-4} \frac{\sqrt{\frac{T}{M}}}{\sigma^2 * \Omega_k} = 1.9891 * 10^{-4} \frac{\sqrt{\frac{298}{4.003}}}{2.551^2 * 0.7035}$$

$$k = 3.74 * 10^{-4} \frac{cal}{cm * s * K}$$

Ahora para calcular la viscosidad de la mezcla, se hace con la ecuación empírica de Wilke:

$$k_{mezcla} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i k_i}{\sum_{j=i}^n x_j \phi_{ij}} ; \quad \phi_{ij} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left( 1 + \frac{M_i}{M_j} \right)^{-\frac{1}{2}} * \left[ 1 + \left( \frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{\frac{1}{2}} * \left( \frac{M_j}{M_i} \right)^{\frac{1}{4}} \right]^2$$

Enumerando las sustancias se tiene: 1:  $C_4H_{10}$  ; 2:  $O_2$  ; 3:  $He$

Luego, la tabla que ayuda a los cálculos de la conductividad calorífica de la mezcla queda:

i	j	$\frac{M_i}{M_j}$	$\frac{M_j}{M_i}$	$\frac{\mu_i}{\mu_j}$	$\Phi_{ij}$	$x_j * \Phi_{ij}$	$\sum_{i=1}^3 x_j \Phi_{ij}$
1	1	1	1	1	1	0.512	0.712
	2	1.82	0.55	0.36	0.49	0.18	
	3	14.53	0.07	0.37	0.15	0.02	
2	1	0.55	1.82	2.79	2.31	1.18	1.588
	2	1	1	1	1	0.378	
	3	8	0.125	1.02	0.3	0.03	
3	1	0.07	14.3	2.74	6.1	3.12	4.13
	2	0.125	8	0.98	2.4	0.9	
	3	1	1	1	1	0.11	

Finalmente, con los todos los factores calculados, la conductividad calorífica de la mezcla será:

$$k_{mezcla} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i k_i}{\sum_{j=i}^n x_j \phi_{ij}} = \frac{0.512 * 4.72 * 10^{-5}}{0.712} + \frac{0.378 * 6.04 * 10^{-5}}{1.588} + \frac{0.110 * 3.74 * 10^{-4}}{4.13} = 5.83 * 10^{-5} \frac{cal}{cm * s * K}$$