

# Fenómenos de Transporte 1

## Ejercicios Agosto – Diciembre 2017

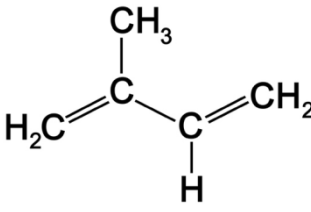
### EJERCICIO 1

Estimar la viscosidad del acetileno gaseoso a 45 °C y 1 atm, aplicando (A) la teoría cinética de Chapman-Enskog y (B) el método de Stiel y Thodos.

RESPUESTA:  $1.094 \times 10^{-5}$  Pa·s (B)  $1.057 \times 10^{-5}$  Pa·s

### EJERCICIO 2

El isopreno (nombre IUPAC: 2-metil-1,3-butadieno) es un compuesto orgánico sintetizado por muchas plantas que forma la unidad estructural de muchos compuestos de importancia biológica. Fue obtenido inicialmente a partir de la degradación térmica del hule natural. Actualmente se produce alrededor de 800 mil toneladas al año como subproducto de la descomposición térmica del petróleo y como subproducto de la producción de etileno. Un 95% del isopreno producido se convierte en cis-1,4-poli-isopreno (una versión sintética del hule natural).

<b>ISOPRENO</b> 	Fórmula molecular	$C_5H_8$
	Número CAS	78-79-5
	Punto de fusión	-120 °C
	Punto de ebullición	34 °C
	Temperatura crítica	211 °C
	Presión crítica	38.5 bar
	Volumen molar crítico	277 cm <sup>3</sup> /mol
	Factor acéntrico	0.158
	Densidad de líquido a 20°C	0.681 g/cm <sup>3</sup>

Aplicando la teoría cinética de Chapman y Enskog, estimar la viscosidad del vapor de isopreno a 47 °C y 1 atm.

RESPUESTA:  $7.66 \times 10^{-6}$  Pa·s

### EJERCICIO 3

Estimar la viscosidad del argón a 20 °C y 400 bar.

RESPUESTA: 449  $\mu$ P

### EJERCICIO 4

Estimar la viscosidad del ciclopropano gaseoso a 435 °C y 110 atm.

RESPUESTA: 254  $\mu$ P

### EJERCICIO 5

Calcular la viscosidad de una mezcla gaseosa de 24% mol amoniaco y 76% mol hidrógeno a 33°C. A esa temperatura, la viscosidad del H<sub>2</sub> es 90.6  $\mu$ P y la viscosidad del NH<sub>3</sub> es 105.9  $\mu$ P.

RESPUESTA: 106.9  $\mu$ P

### EJERCICIO 6 – OPCIONAL

El gas de chimenea es la mezcla gaseosa que se libera como producto de la combustión en calderas, hornos, plantas de energía eléctrica, etcétera. Su composición depende del combustible que se use, pero generalmente consiste en su mayoría de nitrógeno (del aire de combustión), dióxido de carbono, vapor de agua, oxígeno (del aire en exceso), y

pequeñas cantidades de algunos contaminantes como partículas sólidas, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono y mercurio. Frecuentemente, este gas de chimenea recibe un tratamiento antes de ser liberado a la atmósfera, para reducir su impacto ambiental (por ejemplo, secuestro de CO<sub>2</sub> o eliminación del SO<sub>2</sub>). Para el diseño preliminar de un equipo de absorción, un ingeniero químico necesita estimar la viscosidad a 80 °C de un gas de chimenea compuesto por 76.5% N<sub>2</sub>, 12.6% CO<sub>2</sub>, 6.2% H<sub>2</sub>O, 4.7% O<sub>2</sub>, y trazas (despreciables) de CO, NO<sub>x</sub>, Hg y SO<sub>2</sub>.

RESPUESTA: 196.3 μP

### EJERCICIO 7

Un aceite para motor tiene una viscosidad de 3850 cP a 0 °C y de 53 cP a 65 °C. Asumiendo que la ecuación de Andrade es aplicable para este aceite, estimar su viscosidad a 25 °C.

RESPUESTA: 594 cP

### EJERCICIO 8 – OPCIONAL

Estimar la viscosidad del ácido 3-fenil-propanóico (C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-COOH) como líquido a 50 °C, aplicando el método de van Velzen. Calcular el error porcentual de su resultado, sabiendo que a esa temperatura su viscosidad es 9.8 cP.

RESPUESTA: 8.61 × 10<sup>-3</sup> Pa·s

### EJERCICIO 9

Estimar la viscosidad a temperatura ambiente de una mezcla líquida con 33% mol de acetonitrilo y 67% mol de acetato de butilo. La viscosidad de los componentes puros a temperatura ambiente es 0.37 y 2.98 cP, respectivamente.

RESPUESTA: 1.5 cP

### EJERCICIO 10 – OPCIONAL

Los siguientes datos corresponden a mediciones del comportamiento reológico en estado estable de una solución acuosa de alginato de sodio al 1.5% adicionada con 0.5% de goma gelan (Corral Martínez, 2009).

rapidez de deformación	s <sup>-1</sup>	0.396	0.660	0.792	1.32	1.98	2.64	3.30	3.96	5.28	6.6	7.92	13.2	15.8	26.9	39.6	66.0	79.2	132
esfuerzo cortante	dina/cm <sup>2</sup>	0.04	0.06	0.08	0.16	0.24	0.36	0.46	0.51	0.69	0.85	1.03	1.66	1.98	3.05	4.32	6.47	7.46	10.8

Corral Martínez (2009). "Velocidad de sedimentación de óxido de zirconio dispersado en alginato de sodio adicionado con goma gelan". Residencia profesional, Ingeniería Química, Instituto Tecnológico de Durango.

Generar el gráfico esfuerzo-deformación para este fluido, y determinar los parámetros reológicos correspondientes al modelo de la potencia.

RESPUESTA:  $n = 0.9766$ ,  $K = 0.011931 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$

### EJERCICIO 11 – OPCIONAL

En cada caso, resolver la ecuación diferencial. Cuando se proporcione condiciones de frontera, emplearlas para obtener la solución particular.

RESPUESTAS:

- $$\frac{dy}{dx} = e^{3x+2y} \qquad -3e^{-2y} = 2e^{3x} + C$$
- $$(4y + yx^2)dy - (2x + xy^2)dx = 0 \qquad 2 + y^2 = C(4 + x^2)$$
- $$x \frac{dy}{dx} + 2y = 3 \qquad y = \frac{3}{2} - \frac{C}{2x^2}$$

4.  $\frac{dy}{dx} + e^{-3x} = 0$   $y = \frac{1}{3}e^{-3x} + C$
5.  $\frac{dy}{dx} + y = e^{3x}$  sujeta a  $y(0) = 1$   $y = \frac{1}{4}e^{3x} + \frac{3}{4}e^{-x}$
6.  $2\frac{d^2y}{dx^2} + 5\frac{dy}{dx} = 0$   $y = C_1 + C_2e^{-\frac{5}{2}x}$
7.  $\frac{d^2y}{dx^2} + 9y = 0$   $y = C_1 \sin(3x) + C_2 \cos(3x)$
8.  $\frac{d^2y}{dx^2} - 10\frac{dy}{dx} + 25y = 0$   $y = C_1e^{5x} + C_2xe^{5x}$
9.  $\frac{d^2y}{dx^2} - 4\frac{dy}{dx} + 5y = 0$   $y = C_1e^{2x} \sin x + C_2e^{2x} \cos x$

### EJERCICIO 12

Considérese un fluido newtoniano, fluyendo de forma laminar a través de una tubería horizontal de radio  $R$  y longitud  $L$ , en respuesta a una diferencia de presión ( $P_0$  en un extremo y  $P_L$  en el otro). Establecer todos los términos del balance diferencial de momentum, tomando como volumen de control una envoltura cilíndrica hueca de espesor  $\Delta r$  y longitud  $L$ , para llegar a la ecuación diferencial que describe dicho flujo. Resolver la ecuación diferencial para encontrar el perfil de velocidad  $v_z$  en función de  $r$ .

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

### EJERCICIO 13

El espacio entre dos cilindros coaxiales se encuentra lleno con un fluido newtoniano incompresible a temperatura constante. Los radios de las superficies interna y externa que se encuentran en contacto con el líquido son  $\kappa R$  y  $R$  respectivamente ( $\kappa < 1$ ). El cilindro externo se mantiene fijo, mientras que el cilindro interno se hace girar con una velocidad angular  $\Omega$  constante. Mediante simplificación de las ecuaciones de conservación, determinar el perfil de velocidades del fluido entre los dos cilindros.

NOTA 1: Recordar que la velocidad tangencial es igual al producto de la velocidad angular por el radio de giro.

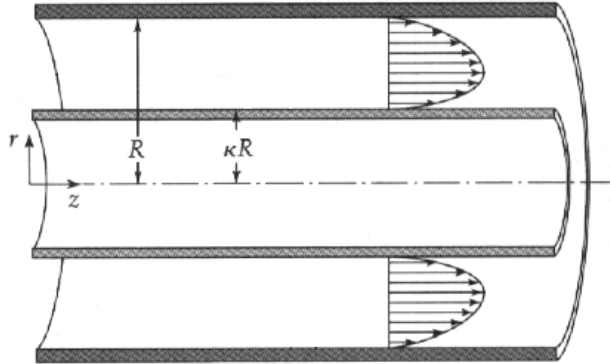
NOTA 2: Se puede asumir que la velocidad de rotación es baja (flujo reptante), de tal forma que se puede despreciar los términos de advección.

$$\text{RESPUESTA: } v_\theta = \frac{\kappa^2 \Omega R}{1 - \kappa^2} \left( \frac{R}{r} - \frac{r}{R} \right)$$

### EJERCICIO 14

Adaptado de Bird (2002)

Se desea encontrar el perfil de velocidad  $v_z(r)$  de un fluido newtoniano en flujo laminar estable e isotérmico en el espacio anular entre dos tuberías cilíndricas coaxiales de radios  $R$  y  $\kappa R$  y longitud  $L$ . Hay una diferencia de presión entre los extremos de la tubería, que da lugar a un gradiente de presión dado por  $\partial P / \partial z = -(P_0 - P_L) / L$ , donde  $P_0$  es la presión en  $z = 0$ , y  $P_L$  es la presión en  $z = L$ . Como las tuberías están horizontales, se puede ignorar el efecto de la gravedad.



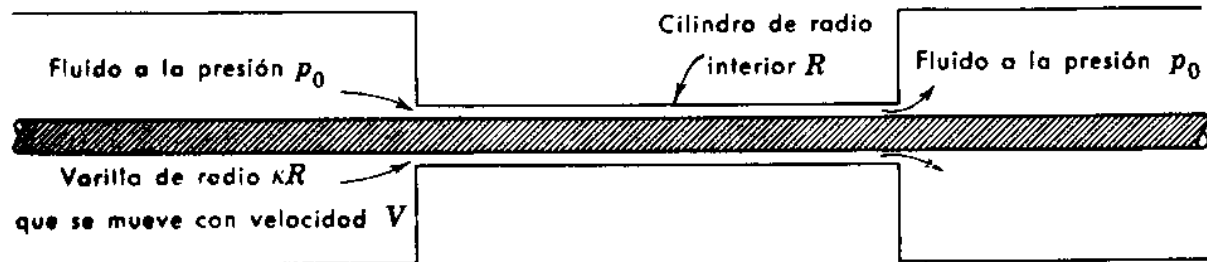
$$\text{RESPUESTA: } v_z = \frac{(P_0 - P_L)R^2}{4\mu L} \left[ 1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2 + \left(\frac{1 - \kappa^2}{\ln(1/\kappa)}\right) \ln\left(\frac{r}{R}\right) \right]$$

### EJERCICIO 15

Adaptado de Bird (1960)

Considerar el sistema representado en la figura en el que la varilla cilíndrica de radio externo  $\kappa R$  se mueve coaxialmente con una velocidad  $V$  a través del interior de un tubo cilíndrico de radio interno  $R$ . El espacio entre la varilla y el tubo se encuentra lleno de un fluido viscoso. Este tipo de problemas se presenta en el recubrimiento de alambres con barniz. Encontrar el perfil de velocidades en estado estacionario.

OPCIONAL: Determinar el flujo volumétrico en el espacio entre la varilla y el tubo.

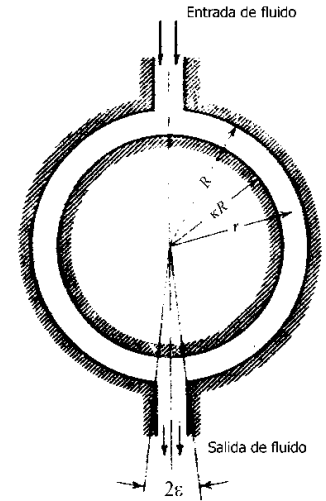


$$\text{RESPUESTAS: } \frac{v_z}{V} = \frac{\ln(r/R)}{\ln \kappa}; \quad Q = \frac{\pi R^2 V}{2} \left[ \frac{(1 - \kappa^2)}{\ln(1/\kappa)} - 2\kappa^2 \right]$$

### EJERCICIO 16 – OPCIONAL

Adaptado de Bird (1960).

Un fluido newtoniano muy viscoso fluye en el espacio  $\kappa R \leq r \leq R$  (con  $0 < \kappa < 1$ ) entre dos esferas concéntricas, como se muestra en la figura. Se desea hallar la velocidad de flujo en el sistema en función de la diferencia de presión que se le aplica. Supóngase que  $v_\theta = v_\theta(r, \theta)$  y que  $v_r = 0$  y  $v_\phi = 0$ . Despréciense además la gravedad y los efectos en los extremos.



(A) Demostrar, utilizando la ecuación de continuidad, que  $v_\theta \sin\theta = u(r)$ , siendo  $u(r)$  una función aún desconocida.

(B) Escribir el componente  $\theta$  de la ecuación de movimiento para este sistema, suponiendo velocidades de flujo suficientemente bajas, de forma que pueda despreciarse los términos de advección. Demostrar que esta ecuación queda reducida a:

$$0 = -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} + \mu \left[ \frac{1}{r^2 \sin\theta} \frac{d}{dr} \left( r^2 \frac{du}{dr} \right) \right]$$

### EJERCICIO 17

Se tiene un fluido no newtoniano que obedece la ley de la potencia, que desciende de forma laminar en una película de espesor constante  $\delta$ , debido a la acción de la gravedad. Determinar el perfil de velocidad  $v_z$  en función de  $x$ .

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

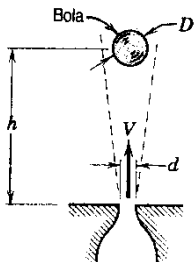
### EJERCICIO 18

En un experimento de laboratorio de mecánica de fluidos, se vacía un tanque de diámetro  $D$  que tiene un nivel inicial de agua  $h_0$ . El agujero de drenaje está perfectamente redondeado y tiene diámetro  $d$ . El experimentador supone que el tiempo de vaciado  $t$  depende de  $h_0$ ,  $D$  y  $d$ , así como de la gravedad  $g$ , y de la densidad  $\rho$  y viscosidad  $\mu$  del agua. Empleando el teorema pi de Buckingham, encontrar un conjunto de grupos adimensionales pertinentes a este experimento.

$$\text{RESPUESTA: } \pi_1 = \frac{t^2 g}{D}, \quad \pi_2 = \frac{d}{D}, \quad \pi_3 = \frac{h_0}{D}, \quad \pi_4 = \frac{\mu^2}{\rho^2 g D^3}$$

### EJERCICIO 19

Adaptado de Bird (1960)



El dibujo presenta un chorro de aire que se descarga verticalmente. Experimentalmente se ha demostrado que una esfera situada en el chorro permanece suspendida en una posición estable, donde la altura de equilibrio  $h$  depende del peso de la esfera  $W$ , del diámetro de la esfera  $D$ , del diámetro de la boquilla  $d$ , y de la velocidad de salida del aire  $v$ , así como de la densidad  $\rho$  y la viscosidad  $\mu$  del aire. Empleando el teorema pi de Buckingham, encontrar los grupos adimensionales que caracterizan este fenómeno.

$$\text{UNA RESPUESTA: } \pi_1 = \frac{h}{d}, \quad \pi_2 = \frac{W}{\rho v^2 d^2}, \quad \pi_3 = \frac{D}{d}, \quad \pi_4 = \frac{\mu}{\rho v d}$$

### EJERCICIO 20

Calcular la velocidad terminal de una esfera de bronce ( $8520 \text{ kg/m}^3$ ) de 1 mm de diámetro si cae en (A) aire a  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ , (B) agua a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , y (C) glicerina a  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $\rho = 1267 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu = 2.23 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ). En cada caso, reportar la velocidad terminal en m/s, el número de Reynolds y el coeficiente de arrastre.

RESPUESTA: (A) 14 m/s, (B) 0.4 m/s, (C) 0.00177 m/s

### EJERCICIO 21

Adaptado de White, "Fluid Mechanics", 2ª edición, McGraw-Hill, 1986.

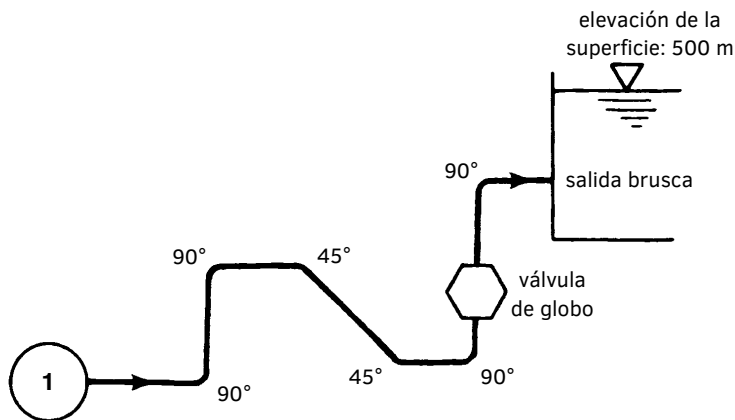
Se desea regar un jardín empleando un manguerón de 30 m de longitud, que tiene un diámetro interno de  $\frac{1}{2}$  plg y una rugosidad de 0.01 plg. ¿Cuál será el flujo de agua, en litros por minuto, si la presión del agua donde se conecte la manguera es  $4.2 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$  (manométrica)?

RESPUESTA: 20.2 LPM

### EJERCICIO 22

Adaptado de White, "Fluid Mechanics", 2ª edición, McGraw-Hill, 1986.

El sistema mostrado en la figura consta de 1200 metros de tubería de hierro fundido de 2 plg cédula 40, dos codos de  $45^\circ$  y cuatro de  $90^\circ$  (de radio largo, con bridas), una válvula de globo completamente abierta, y una salida brusca en el depósito. Si la elevación en el punto 1 es 400 m, qué presión manométrica es necesaria en el punto 1 para obtener un flujo de 300 LPM hacia el depósito? El fluido es agua a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

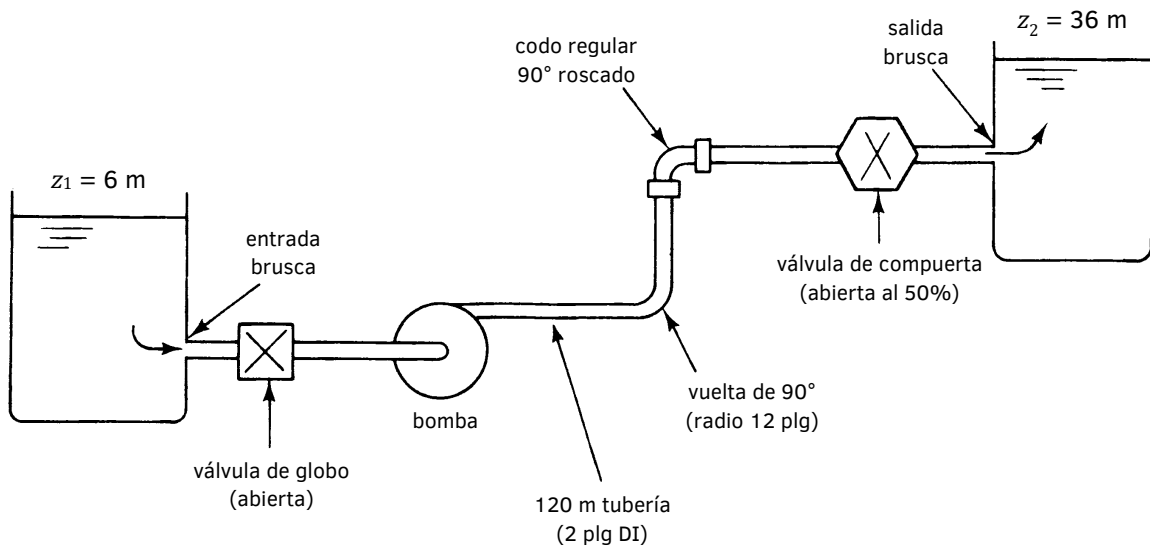


RESPUESTA: 27.8 atm

### EJERCICIO 23 – OPCIONAL

Adaptado de White, "Fluid Mechanics", 2ª edición, McGraw-Hill, 1986.

Se bombea agua ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ,  $0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ) de un depósito a otro, a razón de 570 litros por minuto, a través de 120 m de tubería de 2 plg (diámetro interno) y varios accesorios, como se muestra en la figura. La rugosidad relativa de la tubería es 0.001. Determinar la potencia necesaria de la bomba, si tiene una eficiencia del 70%.



RESPUESTA: 12 kW