

## VII. DISEÑO DE LA 1a. TORRE ABSORBEDORA

### 7.1 DETERMINACION DEL FLUJO DE LIQUIDO

#### Planteamiento del problema.

Se va a eliminar el  $\text{SO}_2$  del gas producto de la combustión de un aceite residual. Para ésto, el gas se lavará con agua.

El gas entrante, con un flujo de  $0.71 \text{ m}^3/\text{min}$  ( $0.0118 \text{ m}^3/\text{s}$ ) a una temperatura de  $25^\circ\text{C}$  y presión de 1 atm, contendrá .045 % en volumen de  $\text{SO}_2$ , el cual se eliminará un 90 % en dos torres absorbedoras. En una primera unidad de absorción se eliminará el 70 % del  $\text{SO}_2$ . El gas que abandone la primera torre pasará, posteriormente, a una segunda unidad de absorción, donde se eliminará el 20 % restante del contenido original de  $\text{SO}_2$ .

El agua entrará a la primera unidad a la misma temperatura que el gas. La temperatura se supondrá constante e igual a  $25^\circ\text{C}$ .

Se utilizará un flujo de circulación del agua de 1.5 veces el mínimo.

Calcular el flujo de circulación del agua requerido para la primera torre.

Suponer, en el equilibrio, un sistema aire- $\text{SO}_2$ -agua.

#### Solución:

El primer paso de solución consiste en representar la curva de equilibrio.

Para ésto, se debe representar la curva de equilibrio del sistema agua- $\text{SO}_2$ -aire, en unidades de fracciones molares, a 1 atm y  $25^\circ\text{C}$ , en el intervalo de adecuado de concentraciones.

La bibliografía nos reporta los siguientes datos acerca de la solubilidad del  $\text{SO}_2$  en el agua a  $20$  y  $30^\circ\text{C}$  (tabla 7-1) :

Tabla 7-1. Solubilidad del SO<sub>2</sub> en el agua, 20 y 30 °C\*

C <sub>A</sub> ' = Pesos de SO <sub>2</sub> por 100 pesos de H <sub>2</sub> O	Presión parcial de 20 °C	SO <sub>2</sub> , mmHg 30 °C
10	698	
7.5	517	688
5.0	336	452
2.5	161	216
1.5	92	125
1.0	59	79
0.7	39	52
0.5	26	36
0.3	14.1	19.7
0.2	8.5	11.8
0.15	5.8	8.1
0.10	3.2	4.7
0.05	1.2	1.7
0.02	0.5	0.6

\* Tomado del Manual del I. Q., tabla 3-144, secc. 3-126; 1995.

A fin de representar los datos de equilibrio de este sistema en particular, se realizan interpolaciones entre las presiones parciales de 20 y 30 °C para encontrar el valor de la presión parcial a 25 °C.

Las coordenadas  $y_e^*$  se encuentran dividiendo entre 760 (presión total) las presiones parciales tomadas de los datos de equilibrio.

$$y_e^* = \bar{p}_A / p_t = \bar{p}_A / 760$$

Mientras que las coordenadas de  $x_e^*$  se calculan con la siguiente relación:

$$x_e^* = (c_A' / 64) / (c_A' / 64 + 100 / 18)$$

donde 64 es el peso molecular promedio del SO<sub>2</sub> y 18 el del agua; c<sub>A</sub>' gr de SO<sub>2</sub> / 64 son las moles de SO<sub>2</sub>, y 100/18 son las moles de agua.

Las relaciones molares correspondientes serían:

$$x = \text{mol de A} / \text{moles totales de líquido}$$

$$x = \text{moles de SO}_2 / \text{moles (SO}_2 + \text{agua)}$$

$$X = \text{moles de A} / \text{moles de disolvente}$$

$$X = x / (1 - x)$$

$$y = \text{moles de A} / \text{moles totales de gas}$$

$$y = \text{moles de SO}_2 / \text{moles aire}$$

$$Y = \text{moles de A} / \text{moles de gas seco}$$

$$Y = y / (1 - y)$$

Tabla 7-2. Solubilidad del SO<sub>2</sub> en agua, a 25 °C y 1 atm.

C <sub>A</sub>	P <sub>A</sub> parcial, mmHg	x (10 <sup>-4</sup> )	X (10 <sup>-4</sup> )	y(10 <sup>-3</sup> )	Y(10 <sup>-3</sup> )
7.5	602.5	206.6	210.9	792.8	3825.4
5.0	394.0	138.7	140.6	518.4	1076.5
2.5	188.5	69.8	70.30	248.02	329.83
1.5	108.5	42.0	42.20	142.8	166.5
1.0	69.0	28.0	28.10	90.79	99.86
0.7	45.5	19.6488	19.687	59.87	63.68
0.5	31.0	14.0427	14.063	40.789	42.524
0.3	12.05	8.430	8.4375	15.855	16.111
0.2	7.1	5.6218	5.625	9.342	9.43
0.15	4.8	4.217	4.2187	6.3158	6.3559
0.10	3.95	2.8117	2.8125	5.1974	5.2245
0.05	1.45	1.4060	1.4062	1.9079	1.9115
0.02	0.55	0.56247	0.5625	0.72368	7.2421

Se toma como base 1 min (por conveniencia).  
Se define L, L<sub>s</sub>, G, G<sub>s</sub> en kmol/min.

Se impondrá subíndice 1 para designar las corrientes al fondo de la torre, y subíndice 2 para referirse a la parte superior.

$$G = 0.71 \text{ m}^3/\text{min} \times (273/298) \times (1/22.41) = 0.029 \text{ kmol/min}$$

$$y_1 = 0.00045 = 4.5 \times 10^{-4}$$

$$Y_1 = y_1 / (1 - y_1) \cong 4.5 \times 10^{-4} \text{ kmol SO}_2/\text{kmol gas seco}$$

$$G_s = G_1 (1 - Y_1) = 0.028991 \text{ kmol/min} \cong 0.029 \text{ kmol/min}$$

Para la absorción del 70 % del SO<sub>2</sub>:

$$Y_2 = 0.3 (4.5 \times 10^{-4}) = 1.35 \times 10^{-4} \text{ kmol SO}_2/\text{kmol de gas seco}$$

$$y_2 \cong Y_2 / (1 + Y_2) \cong 1.35 \times 10^{-4} \text{ f mol}$$

$$x_2 = 0 \quad X_2 = 0$$

En la figura 7, junto a la curva de equilibrio se trazan las líneas de operación, las cuales se originan en el punto A. Para el flujo mínimo de agua,  $L_{S \text{ min}}$ , se traza la línea AB que toca a la curva de equilibrio en el punto B. De ahí:

$$\text{En } Y_1 = 4.5 \times 10^{-4}, \quad X_1^* = 3.5 \times 10^{-5} \quad (\text{punto B})$$

La línea AB es la línea de reflujo mínimo, con pendiente  $L_{S \text{ min}} / G_s$

En la línea de equilibrio, la pendiente  $m$  entre la primera pareja de puntos es:

$$\begin{aligned} m &= \Delta y / \Delta x \\ m &= (7.2368 \times 10^{-4} - 0) / (5.6247 \times 10^{-5} - 0) \\ m &= 12.87 \end{aligned}$$

Por lo tanto, la línea de equilibrio,  $y^* = mx$ , queda representada por:

$$y^* = 12.87 x$$

Del balance de masa :

$$\begin{aligned} L_S (X_1 - X_2) &= G (Y_1 - Y_2) \\ \text{puesto que } X_2 &= 0, \\ L_S / G_S &= (Y_1 - Y_2) / X_1^* \\ L_{S \text{ min}} &= G_S (Y_1 - Y_2) / X_1^* \\ L_{S \text{ min}} &= 0.029 (4.5 \times 10^{-4} - 1.35 \times 10^{-4}) / 3.5 \times 10^{-5} \\ L_{S \text{ min}} &= 0.261 \text{ kmol agua/min} \end{aligned}$$

Para  $L_S$  igual a 1.5 veces el mínimo:

$$L_S = 1.5 (0.261) = 0.392 \text{ kmol agua/min}$$

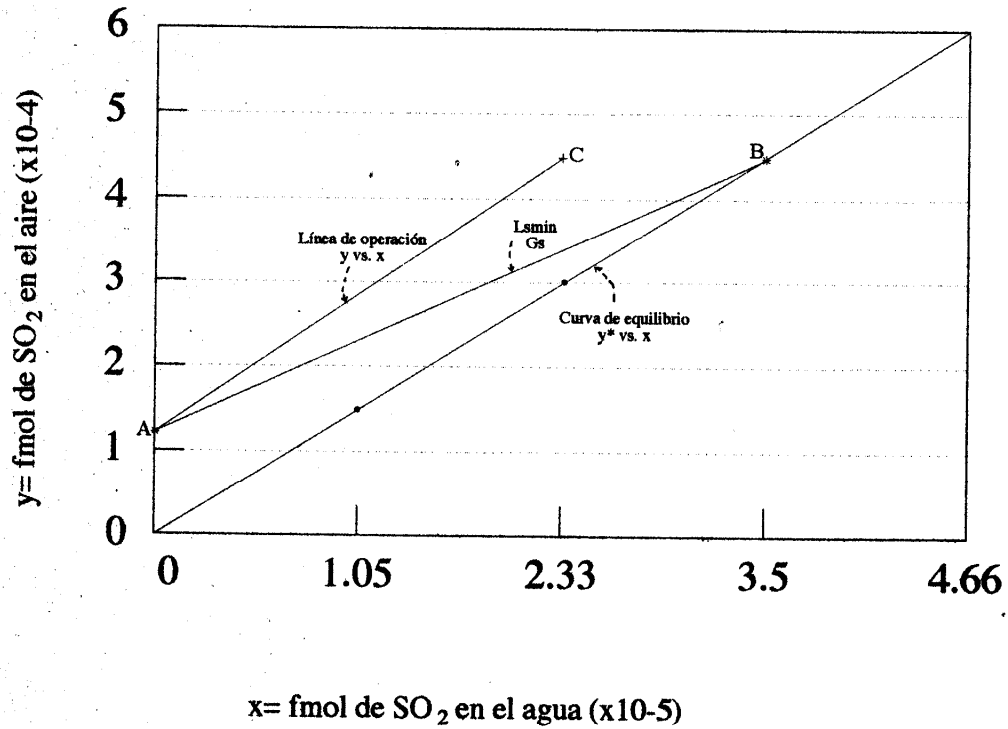
Y la concentración de  $\text{SO}_2$  en el agua de salida de la primera torre será:

$$\begin{aligned} X_1 &= (L_S / G_S) (Y_1 - Y_2) \\ X_1 &= (0.029 / 0.392) (4.5 \times 10^{-4} - 1.35 \times 10^{-4}) \\ X_1 &= 2.33 \times 10^{-5} \text{ f mol} \end{aligned}$$

Con  $Y_1 = 4.5 \times 10^{-4}$  y  $X_1 = 2.33 \times 10^{-5}$  f mol se tiene al punto C. La línea AC se conoce como línea de operación y tiene pendiente  $L_S / G_s$ .

**Respuesta.** Para 1.5 veces el mínimo, el flujo de circulación del agua es de 0.392 kmol/min = 7.05 kg/min = 0.1175 kg/seg.

# LINEAS DE EQUILIBRIO Y OPERACION 1er. lavador



$$y^* = 12.87x, \quad y = 13.15x$$

Sistema Aire-SO<sub>2</sub>-agua, 25° C, 1 atm

Fig. 7 Línea de equilibrio y línea operante, 1er. absorbedor.

## 7.2 DETERMINACION DEL DIAMETRO DE LA TORRE

### Planteamiento del problema.

De acuerdo con el problema anterior, se va a eliminar  $\text{SO}_2$  de un gas cuyas características pueden tomarse como las del aire. A fin de lograr lo anterior, el gas será lavado con agua en una torre empacada con anillos Pall de 16 mm (5/8 plg). El gas entra con un flujo de  $0.71 \text{ m}^3/\text{min}$ . a 1 atmósfera de presión y  $25^\circ\text{C}$ . Contiene .045 % de  $\text{SO}_2$  y se eliminará el 70 %. El flujo de agua, ya calculado, entrará a  $0.392 \text{ kmol}/\text{min}$  ( $7 \text{ kg}/\text{min}$ ).

Escoger un diámetro adecuado de la torre.

### Solución:

#### Datos:

$\rho_{\text{H}_2\text{O}, 25^\circ\text{C}} = \rho_L = 997.045 \text{ kg}/\text{m}^3 = 62.113 \text{ lb}/\text{pie}^3$  (Manual del Ing. Químico, secc. 3; 1995)

$\mu_{\text{H}_2\text{O}, 25^\circ\text{C}} = 0.894 \text{ cp}$  (Manual del I. Q., secc. 3; 1995)

Peso molecular del gas de entrada (PM) = 30.49

$$\begin{aligned} y_1 &= 4.5 \times 10^{-4} \cong Y_1 & y_2 &= 1.35 \times 10^{-4} \cong Y_2 \\ x_1 &= 2.33 \times 10^{-5} \cong X_1 & x_2 &= 0 = X_2 \end{aligned}$$

Para el cálculo del diámetro de la torre se trabajará con los flujos promedio de gas y agua.

Flujo volumétrico del gas de entrada =  $V = 0.71 \text{ m}^3/\text{min} = 0.0118 \text{ m}^3/\text{s}$

Flujo molar del gas =  $G = 0.029 \text{ kmol}/\text{min} = 4.83 \times 10^{-4} \text{ kmol}/\text{s}$

Flujo másico =  $G' = 0.87 \text{ kg}/\text{min} = 0.014 \text{ kg}/\text{seg}$

$\rho_G = \rho_{\text{Gas}, 25^\circ\text{C}} = (30.49/22.41) \times (273/298) = 1.24 \text{ kg}/\text{m}^3 = 0.07766 \text{ lb}/\text{pie}^3$

Para una absorción del 70 % del  $\text{SO}_2$ :

$$\begin{aligned} \text{SO}_2 \text{ eliminado} &= (0.029 \text{ kmol}/\text{min})(4.5 \times 10^{-4})(.7)(64 \text{ kg}/\text{kmol}) \\ &= 5.845 \times 10^{-4} \text{ kg}/\text{min} = 9.13 \times 10^{-6} \text{ kmol}/\text{min} \end{aligned}$$

Flujo de líquido a la salida =  $L' = 7.05 + 5.845 \times 10^{-4} = 7.05 \text{ kg}/\text{min}$

**Determinación del diámetro (D.I.) de la torre y caída de presión:**

Primer intento:

Asumimos D.I. = 15 cm (6 plg)

$$\text{Area de sección transversal} = \pi(D.I.)^2/4 = \pi(.15 \text{ m})^2/4$$

$$A_{S.T.} = 0.01767 \text{ m}^2$$

Por lo tanto:

$$G = (0.014 \text{ kg/seg})/0.01767 \text{ m}^2 = 0.79 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} = 0.162 \text{ lb/pie}^2 \cdot \text{s}$$

$$L = 0.1175 / 0.01767 = 6.65 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} = 1.36 \text{ lb/pie}^2 \cdot \text{s}$$

Del Apéndice K (Fig. 18-38, Manual del Ing. Químico; 1995), calculamos la abscisa:

$$(L / G) (\rho_G / \rho_L)^{1/2} = (1.36 / 0.162) (0.07766 / 62.113)^{1/2} = 0.297$$

$$L, G [=] \text{ lb/pie}^2 \cdot \text{s}$$

$$\rho_G, \rho_L [=] \text{ lb/pie}^3$$

Para el cálculo de la ordenada:

Para anillos Pall, 16 mm (5/8 plg):

$F_p = 97$  Ver Apéndice L (tabla 18-5, Biblioteca del Ing. Químico; 1986)

$$\psi = \rho_{H_2O} / \rho_L = 1$$

$$g_c = 32.2 \text{ lb} \cdot \text{pie} / \text{lb} \cdot \text{s}^2$$

$$\mu^{0.2} = 0.978$$

$$G^2 F_p \psi \mu^{0.2} / \rho_G \rho_L g_c = (0.162)^2 (97) (1) (0.978) / [(0.07766)(62.113)(32.2)]$$

$$G^2 F_p \psi \mu^{0.2} / \rho_G \rho_L g_c = 0.016$$

Según el Apéndice K, a la intersección de ambas coordenadas le corresponde una caída de presión,  $\Delta P$ , de 0.20 plg/pie, mientras en el Apéndice M (Fig. 9-11A Ludwig; 1964), este punto se observa claramente fuera de la región de operación, por debajo del límite inferior aproximado de la zona de carga.

De acuerdo a lo anterior:

Se presenta condición de operación por debajo del límite inferior, con  $\Delta P$  de 0.20 plg  $H_2O$ /pie, lo cual indica que se requiere un diámetro menor de la torre.

Segundo intento:

Se supone D.I. de 12.5 cm (5 plg)

Poniendo atención a las relaciones correspondientes a las coordenadas, se observa que el incremento en el diámetro de la torre no repercute en el valor de la abscisa (pues la relación L/G permanece constante), pero sí en el valor de la ordenada.

$$\text{Abscisa} = 0.297$$

$$A_{S.T.} = 0.01227 \text{ m}^2$$

$$G = 0.014/0.01227 = 1.145 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} = 0.234 \text{ lb/pie}^2 \cdot \text{s} = 842.5 \text{ lb/pie}^2 \cdot \text{hr}$$

$$L = 0.1175/0.01227 = 9.58 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} = 1.957 \text{ lb/pie}^2 \cdot \text{s} = 7,046 \text{ lb/pie}^2 \cdot \text{hr}$$

Ahora, el valor de la ordenada es:

$$G^2 F_P \psi \mu^{0.2} / \rho_G \rho_L g_C = (0.234)^2 (97)(1)(0.978) / [(0.07766)(62.113)(32.2)]$$

$$G^2 F_P \psi \mu^{0.2} / \rho_G \rho_L g_C = 0.0335$$

Este punto sí cae dentro de la línea de operación con  $\Delta P = 0.5$  plg/pie, en el Ap. K, y más aún, según el Ap. M, cae muy cerca de la línea B, que representa la mayoría de los datos. Para los flujos dados, en una torre con un D.I. de 12.5 cm, se produce una  $\Delta P$  de 0.5 plgH<sub>2</sub>O/pie. De acuerdo a la bibliografía (Manual del Ing. Químico, secc. 14-18; 1995 y Treybal, p. 224; 1993) esta caída de presión es recomendable para operaciones de absorción, por lo tanto, se asume que este diámetro es aceptable.

### 7.3 DETERMINACION DE LA ALTURA DE LA TORRE

#### Planteamiento del problema.

El absorbedor del ejemplo anterior, una torre empacada con diámetro de 12.5 cm (5 plg.), llena de anillos Pall de 16 mm (5/8 plg.), operará bajo las siguientes condiciones:

Gas:

Contenido de SO<sub>2</sub>:

$$\text{entrada: } y_1 = 4.5 \times 10^{-4} \cong Y_1$$

$$\text{salida: } y_2 = 1.35 \times 10^{-4} \cong Y_2$$

$$\text{Flujo de entrada} = 0.71 \text{ m}^3/\text{min} = 4.83 \times 10^{-4} \text{ kmol/s} = G$$

$$G' = (0.014 \text{ kg/seg})/0.01227 \text{ m}^2 = 1.145 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} = 0.234 \text{ lb/pie}^2 \cdot \text{s} = 842.5 \text{ lb/pie}^2 \cdot \text{hr}$$

$$\text{Gas sin SO}_2 = G_s = G(1 - Y_1) \cong G$$



Líquido:

Contenido de SO<sub>2</sub>:

entrada: libre de SO<sub>2</sub>;  $x_2 = 0 = X_2$

salida:  $x_1 = 2.33 \times 10^{-5} \cong X_1$

Flujo entrada = 0.392 kmol/min

$L' = 7.05 \text{ kg/min} = 0.1175 \text{ kg/seg.}$

$L' = 0.1175/0.01227 = 9.58 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} = 1.957 \text{ lb/pie}^2 \cdot \text{s} = 7,046 \text{ lb/pie}^2 \cdot \text{hr}$

Calcular la profundidad del empaque que se requiere.

**Solución:**

Para determinar la altura de la sección empacada, es necesario calcular la altura de una unidad de transferencia, HTU, así como el número de unidades de transferencia, N, ya que:

$$Z = N \cdot \text{HTU}$$

### 7.3.1 DETERMINACIÓN DE LA ALTURA DE UNA UNIDAD DE TRANSFERENCIA

Whitney y Vivian [Chem. Eng. Prog., 45, 325 (1949)] estudiaron la absorción del SO<sub>2</sub> en agua, a distintas temperaturas, utilizando anillos rasching cerámicos con diámetro de 25 mm (1 plg.). Ellos obtuvieron las siguientes relaciones para los coeficientes de transferencia de masa, a una temperatura de 25 °C (77 °F):

$$k_L a = 0.048 L^{0.82}$$

$$k_{Ga} = 0.028 G^{0.7} L^{0.25}$$

donde G y L son los flujos promedio de gas y agua, en lb/hr.pie<sup>2</sup> de sección transversal de la torre.

En el sistema SO<sub>2</sub>-agua, la resistencia a la difusión se encuentran en las dos capas de fluidos en contacto en la interfase gas-líquido. Estas resistencias son aditivas, bajo ciertas condiciones, para dar lugar a una resistencia global (o a su recíproco, un coeficiente global), la cual se utiliza para propósitos de diseño. La suma de estas resistencias es la siguiente:

$$1/K_L a = 1/k_L a + H'/k_{Ga} = H'/K_{Ga}$$

donde,

$K_L a$  es el coeficiente global de absorción basado en la fase líquida, en lbmol/(hr.pie<sup>3</sup>)(lbmol/pie<sup>3</sup>).

$k_{Ga}$  y  $k_{La}$  son los coeficientes de absorción para el gas y para el líquido, respectivamente, en  $\text{lbmol}/(\text{hr}\cdot\text{pie}^3)(\text{lbmol}/\text{pie}^3)$ .  $H'$  es la constante modificada de la ley de Henry. Para el sistema  $\text{SO}_2$ -agua, Whitney y Vivian, determinaron una  $H' = 0.094$  a  $25^\circ\text{C}$ ; por lo que:

$$1/K_{La} = 1/0.048 L^{0.82} + H'/0.028 G^{0.7} L^{0.25} = H'/K_{Ga}$$

Y, si la relación entre el coeficiente global de absorción,  $K_{La}$ , y la altura de una unidad de transferencia,  $\text{HTU}_L$  o  $H_{OL}$  queda definida por la siguiente relación:

$$H_{OL} = L/K_{La}\rho_L = L/k_{La}\rho_L + LH'/k_{Ga}\rho_L$$

Entonces:

$$H_{OL} = L/0.048 L^{0.82} \rho_L + H'L/0.028 G^{0.7} L^{0.25} \rho_L$$

$$H_{OL} = L^{0.18}/0.048 \rho_L + H'L^{0.75}/0.028 G^{0.7} \rho_L$$

Si a  $25^\circ\text{C}$ ,  $H' = 0.094$  y  $\rho_L = 62.113 \text{ lb}/\text{pie}^3$ :

$$H_{OL} = 0.335 L^{0.18} + 0.054 L^{0.75}/G^{0.7}$$

Esta última expresión representa la altura de una unidad de transferencia, para una torre empacada con anillos rasching cerámicos, 1 plg, trabajando con el sistema  $\text{SO}_2$ -agua, a  $25^\circ\text{C}$ , y 1 atm.

Pero, en el problema propuesto, se utilizan anillos Pall como empaque, razón por la cual es necesario realizar algunos ajustes.

Para ajustar las correlaciones encontradas por Whitney y Vivian para anillos Pall plásticos, de 16 mm, se emplea la relación de áreas eficaces de intercambio.

El área interfacial eficaz de contacto entre gas y líquido es la que participa en el intercambio de masa y líquido. Esta área es menor que el área de entrecara real, debido a que zonas estancadas en el líquido llegan a la saturación y ya no participan en la transferencia. El área eficaz tampoco debe confundirse con el área mojada, ya que el área eficaz incluye un fenómeno físico más complejo que el simple flujo de película de líquido por la superficie del empaque.

Weisman y Bonilla [Ind. Eng. Chem., 42, 1099 (1950)] determinaron la siguiente relación entre el área superficial externa del empaque,  $a$ , y el área interfacial eficaz,  $a_i$ :

$$a/a_i = 0.54 G^{0.31} L^{0.07},$$

donde  $G$  y  $L$  se dan en  $\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$

Y si  $G = 1.145 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$  y  $L = 9.58 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ,

$$a_i/a_t = 0.54 (1.145)^{0.31} (9.58)^{0.07},$$

$$a_i/a_t = 0.66$$

$$a_i = 0.66 a_t$$

Para anillos Pall de polipropileno, 16 mm,  $a_t = 340 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ; mientras que para anillos rasching cerámicos, 25 mm,  $a_t = 190 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ; ver el apéndice N (Tabla 18-5, Manual del Ing. Químico, p. 18-25; 1995).

Para los anillos Pall el área interfacial eficaz de contacto es:

$$a_i = 224.4 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

$$= 68.64 \text{ pie}^2/\text{pie}^3$$

Y para los anillos rasching:

$$a_i = 125.4 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

$$= 38.28 \text{ pie}^2/\text{pie}^3$$

Aplicando la relación de áreas eficaces de intercambio a las correlaciones de Whitney y Vivian :

$$k_L a_r = 0.048 L^{0.82}$$

$$k_L a_r (a_p/a_r) = 0.048 L^{0.82} (a_p/a_r)$$

$$k_L a_p = 0.048 L^{0.82} (68.64/38.28)$$

$$k_L a_p = 0.086 L^{0.82}$$

donde  $a_r$  es el área interfacial de contacto eficaz para los anillos rasching y  $a_p$  para los anillos Pall.

Mientras que aplicando un procedimiento similar para el coeficiente de la fase gaseosa, se obtiene:

$$k_G a_r = 0.028 G^{0.7} L^{0.25}$$

$$k_G a_r (a_p/a_r) = 0.028 G^{0.7} L^{0.25} (a_p/a_r)$$

$$k_G a_p = 0.028 G^{0.7} L^{0.25} (68.64/38.28)$$

$$k_G a_p = 0.050 G^{0.7} L^{0.25}$$

Resumiendo,

$$k_L a = 0.086 L^{0.82}$$

$$k_G a = 0.050 G^{0.7} L^{0.25}$$

Y la suma de ambas resistencias nos da una resistencia global:

$$1/K_L a = 1/k_L a + H'/k_G a = H'/K_G a$$

$$1/K_L a = 1/0.086 L^{0.82} + H'/0.050 G^{0.7} L^{0.25} = H'/K_G a$$

La altura de una unidad de transferencia es:

$$H_{OL} = L/K_L a \rho_L = L/k_L a \rho_L + LH'/k_G a \rho_L$$

Entonces:

$$H_{OL} = L/0.086 L^{0.82} \rho_L + H'L/0.050 G^{0.7} L^{0.25} \rho_L$$

$$H_{OL} = L^{0.18}/0.086 \rho_L + H'L^{0.75}/0.050 G^{0.7} \rho_L$$

Si a 25 °C,  $H' = 0.094$  y  $\rho_L = 62.113 \text{ lb/pie}^3$ :

$$H_{OL} = 0.1872 L^{0.18} + 0.0303 L^{0.75}/G^{0.7}$$

donde G y L se dan en  $\text{lb/pie}^2 \cdot \text{h}$

La última expresión sirve para calcular la altura de una unidad de transferencia, para una torre empacada con anillos Pall de polipropileno, 16 mm, trabajando con el sistema SO<sub>2</sub>-agua, a 25 °C, y 1 atm.

A partir de este coeficiente global se pueden determinar los coeficientes individuales para cada fase, H<sub>L</sub> y H<sub>G</sub>, a partir de que:

$$H_{OL} = H_L + (L/mG) H_G$$

Y si ésto lo igualamos a la expresión obtenida anteriormente para H<sub>OL</sub>, se tiene que:

$$H_L = 0.1872 L^{0.18}, \text{ en pies,}$$

mientras que el segundo término:

$$(L/mG) H_G = 0.0303 L^{0.75}/G^{0.7}$$

Utilizando un valor de  $m = y^*/x = 12.87$ , y el peso molecular de 18 y 29 para el agua y aire:

$$(L/G)(29 / 18 \times 12.87) H_G = 0.0303 L^{0.75}/G^{0.7}$$

Con ésto:

$$H_G = 0.242 G^{0.3}/L^{0.25}, \text{ en pies}$$

Ahora, con estos valores de H<sub>L</sub> y H<sub>G</sub>, se puede calcular H<sub>OG</sub>:

$$H_{OG} = H_G + H_L(mG/L)$$

$$H_{OG} = 0.242 G^{0.3}/L^{0.25} + 0.1872 L^{0.18} (mG/L)$$

$$H_{OG} = 0.242 G^{0.3}/L^{0.25} + 0.1872 L^{0.18} (12.87 \times 18/29)(G/L)$$

$$H_{OG} = 0.242 G^{0.3}/L^{0.25} + 1.5 G/L^{0.82}, \text{ en pies}$$

$$H_{OL} = (L/mG) H_{OG}$$

Sustituyendo el valor de  $G = 842.5 \text{ lb/pie}^2 \cdot \text{hr}$  y  $L = 7046 \text{ lb/pie}^2 \cdot \text{hr}$ :

$$H_L = 0.9226 \text{ pies}$$

$$H_{OL} = 0.9226 + 0.2088 = 1.1314 \text{ pies}$$

$$H_G = 0.20 \text{ pies}$$

$$H_{OG} = 0.20 + 0.883 = 1.083 \text{ pies}$$

### 7.3.2 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA.

En los casos en que la curva de distribución en el equilibrio es recta en el intervalo manejado de concentraciones y la relación entre los coeficientes de transferencia de masa es constante, es apropiado utilizar los coeficientes de transferencia de masa globales o totales y si además la mezcla gaseosa está diluida, el número de unidades de transferencia  $N_{OG}$  está definido por la ecuación:

$$N_{OG} = \int_{y_2}^{y_1} dy / (y - y^*)$$

Dado que:

$$y_1 = 4.5 \times 10^{-4}, \quad x_1 = 2.33 \times 10^{-5}, \quad y_1^* = mx_1 = 3 \times 10^{-4}, \quad x_1^* = y_1/m = 3.5 \times 10^{-5}$$

$$y_2 = 1.35 \times 10^{-4}, \quad x_2 = 0, \quad y_2^* = mx_2 = 0, \quad x_2^* = y_2/m = 1.050 \times 10^{-5}$$

Primero hacemos el cálculo de  $N_{OG}$ :

El área bajo la gráfica de  $y$  vs  $1/(y - y^*)$ , se puede calcular con un método de integración numérica.

Empleando el método trapezoidal:

$$\int_a^b f(y) dy = h/2 [ f(a) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} f(y_i) + f(b) ]$$

donde

$$h = (b - a) / n$$

$$a = 1.35 \times 10^{-4}; \quad b = 4.5 \times 10^{-4}; \quad n = 7; \quad h = 0.45 \times 10^{-4}$$

$$f(a) = 7407.4074; \quad \Sigma f(y_i) = 42112.263; \quad f(b) = 6660.263$$

Tabla 7-3. Coordenadas de integración gráfica de  $N_{OG}$

Intervalo	$x (10^{-5})$	$y (10^{-4})$	$y^* (10^{-4})$	$1/(y-y^*)$
0	$x_2=0$	$y_2=1.35$	$y^*_2=0$	7407.407
1	0.333	1.80	0.428	7290.571
2	0.666	2.25	0.857	7177.364
3	0.999	2.70	1.285	7067.618
4	1.331	3.15	1.713	6961.178
5	1.664	3.6	2.142	6857.897
6	1.997	4.05	2.570	6757.635
7	$x_1=2.333$	$y_1=4.5$	$y^*_1=3.00$	6660.263

$$\int_{1.35E-4}^{4.5E-4} \frac{dy}{(y - y^*)} = 0.45 \times 10^{-4} / 2 [7407.4074 + 2(42112.263) + 6660.263]$$

$$\int_{1.35E-4}^{4.5E-4} \frac{dy}{(y - y^*)} = 2.21157$$

Por lo tanto:

$$N_{OG} = 2.21157$$

En la Fig. 8 se muestra la integración gráfica de  $N_{OG}$ .

En seguida, para el cálculo de  $N_{OL}$ :

$$N_{OL} = \int_{x_2}^{x_1} \frac{dx}{(x^* - x)}$$

Con el método trapezoidal:

$$\int_a^b f(x) dx = h / 2 [ f(a) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i) + f(b) ]$$

$$a = 0 ; b = 2.333 \times 10^{-5} ; n = 7 ; h = 0.333 \times 10^{-5}$$

$$f(a) = 95333.333 ; \Sigma f(y_i) = 541984.82 ; f(b) = 85717.579$$

Tabla 7-4. Coordenadas de integración gráfica de  $N_{OL}$ 

Intervalo	$x (10^{-5})$	$y (10^{-4})$	$x^* (10^{-5})$	$1/(x^* - x)$
0	$x_2=0$	$y_2=1.35$	$x_2^*=1.05$	95333.333
1	0.333	1.80	1.399	93829.653
2	0.666	2.25	1.748	92372.671
3	0.999	2.70	2.098	90960.245
4	1.331	3.15	2.448	89590.361
5	1.664	3.6	2.797	88261.128
6	1.997	4.05	3.147	86970.760
7	$x_1=2.333$	$y_1=4.5$	$x_1^*=3.5$	85717.579

$$\int_0^{0.333E-5} dx / (x^* - x) = 0.333 \times 10^{-5} / 2 [95333.33 + 2 (541984.82) + 85717.579]$$

$$\int_0^{0.333E-5} dx / (x^* - x) = 2.1054$$

$$N_{OL} = 2.1054$$

En la figura 9, se muestra el cálculo de la integral de  $N_{OL}$ .

Si partimos del hecho de que además de tratarse de una solución diluida, las líneas de operación y equilibrio son rectas en el intervalo manejado de concentraciones, el cálculo del número de unidades de transferencia se simplifica más aún. Puesto que tanto  $y$  como  $y^*$  varían linealmente con  $x$ , su diferencia también lo hace, así es que se puede utilizar el promedio logarítmico de las diferencias de concentraciones en los puntos terminales de la torre,  $(y - y^*)_M$ , quedando:

$$N_{OG} = (y_1 - y_2) / (y - y^*)_M$$

donde

$$(y - y^*)_M = [(y - y^*)_1 - (y - y^*)_2] / \ln [(y - y^*)_1 / (y - y^*)_2]$$

Igualmente, para la fase líquida:

$$N_{OL} = (x_1 - x_2) / (x^* - x)_M$$

donde:

$$(x^* - x)_M = [(x^* - x)_1 - (x^* - x)_2] / \ln [(x^* - x)_1 / (x^* - x)_2]$$

Para el sistema estudiado, se tiene:

$$y_1 = 4.5 \times 10^{-4}, \quad x_1 = 2.33 \times 10^{-5}, \quad y_1^* = mx_1 = 3 \times 10^{-4}, \quad x_1^* = y_1/m = 3.5 \times 10^{-5}$$

$$y^* = mx = 12.87 x; \quad m = 12.87$$

$$(y - y^*)_1 = 1.5 \times 10^{-4}; \quad (x^* - x)_1 = 1.050 \times 10^{-5}$$

$$y_2 = 1.35 \times 10^{-4}, \quad x_2 = 0, \quad y_2^* = mx_2 = 0, \quad x_2^* = y_2/m = 1.050 \times 10^{-5}$$

$$(y - y^*)_2 = 1.35 \times 10^{-4}; \quad (x^* - x)_2 = 1.050 \times 10^{-5}$$

$$(y - y^*)_M = [1.5 \times 10^{-4} - 1.35 \times 10^{-4}] / \ln [1.5 \times 10^{-4} / 1.35 \times 10^{-4}]$$

$$(y - y^*)_M = 1.4237 \times 10^{-4}$$

$$(x^* - x)_M = (1.17 - 1.050) \times 10^{-5} / \ln [1.17 \times 10^{-5} / 1.050 \times 10^{-5}]$$

$$(x^* - x)_M = 1.109 \times 10^{-5}$$

$N_{OG}$  es igual a:

$$N_{OG} = (y_1 - y_2) / (y - y^*)_M$$

$$N_{OG} = (4.5 - 1.35) \times 10^{-4} / 1.4237 \times 10^{-4}$$

$$N_{OG} = 2.21257$$

Mientras que para la fase líquida:

$$N_{OL} = (x_1 - x_2) / (x^* - x)_M$$

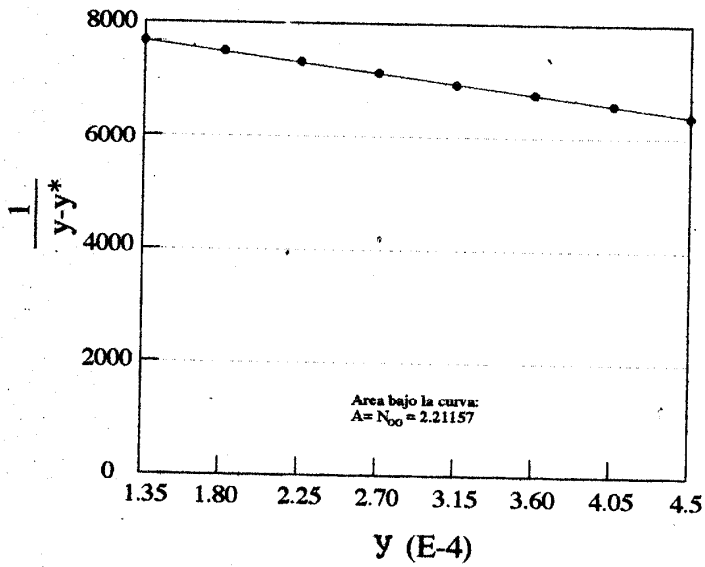
$$N_{OL} = (2.33 \times 10^{-5} - 0) / 1.109 \times 10^{-5}$$

$$N_{OL} = 2.1011$$

Comparando estos valores con los obtenidos por integración numérica, se observa que son muy semejantes. Por lo tanto, es correcto hacer la última simplificación, utilizando la diferencia media logarítmica de concentraciones.



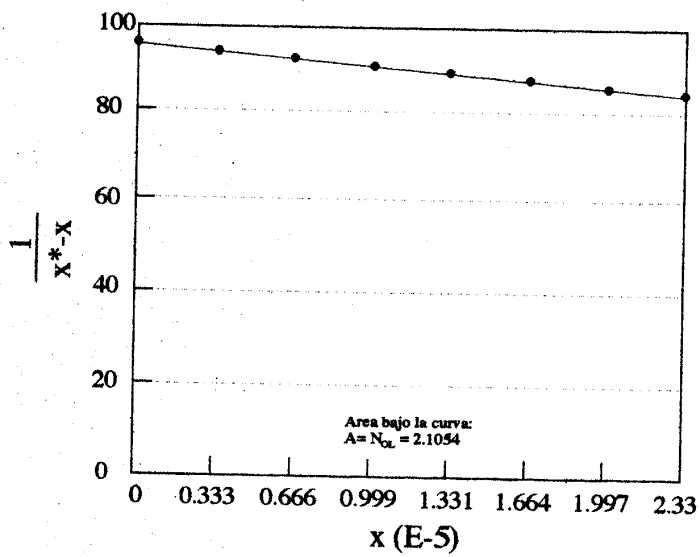
NUMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA,  $N_{OG}$ , FASE GASEOSA  
1er. lavador



Sistema Aire-SO<sub>2</sub>-agua, 25 C, 1 atm

Fig. 8 Integración gráfica de  $N_{OG}$ , 1er. absorbedor.

NUMERO DE UNIDADES DE TRANSFERENCIA,  $N_{OL}$ , FASE LIQUIDA  
1er. lavador



Sistema Aire-SO<sub>2</sub>-agua, 25°C, 1 atm

Fig. 9 Integración gráfica de  $N_{OL}$ , 1er. absorbedor.

### 7.3.3 DETERMINACION DE LA ALTURA TOTAL DE EMPAQUE

Si:

$$N_{OG} = 2.21257 \text{ y } H_{OG} = 1.083 \text{ pies,}$$

$$Z = 2.396 \text{ pies} = 73 \text{ cm}$$

$$N_{OL} = 2.10115 \text{ y } H_{OL} = 1.131 \text{ pies,}$$

$$Z = 2.376 \text{ pies} = 72.5 \text{ cm}$$

**Respuesta.** La altura de la sección de empaque es de 73 cm. El hecho de que  $Z$  obtenida para la fase líquida concuerda para la  $Z$  del gas, significa que el método empleado de los coeficientes globales, así como las simplificaciones para sistemas diluidos y las modificaciones a los coeficientes de transferencia de masa para anillos Pall, son adecuados.

### 7.4 EVALUACION DE LAS CONDICIONES DE LA TORRE

#### Planteamiento del problema.

Se trata de checar el diseño de una torre de absorción con D.I. de 12.5 cm, empacada con anillos Pall de 16 mm (5/8 plg), y una altura igual a 73 cm (2.4 pies).

#### Solución:

#### Caída de presión total

De los rangos de operación, con:

$$\begin{aligned} (L / G) (\rho_G / \rho_L)^{1/2} &= 0.297 \text{ (abscisa)} \\ G^2 F_P \psi \mu^{0.2} / \rho_G \rho_L g_C &= 0.0335 \text{ (ordenada)} \end{aligned}$$

El Apéndice K arroja una  $\Delta P = 0.5$  plg  $H_2O$ /pie de empaque irrigado.

La caída de presión para el empaque seco se calcula con la siguiente expresión:

$$\Delta P / Z = 1.405 \times 10^{-10} C_D G^2 / \rho_G$$

donde:

$C_D = 207$ , Ver Apéndice P (Treybal, p. 221; 1993)

$\rho_G [=] \text{ lb/pie}^3$

$G' [=] \text{ lb/pie}^2.\text{hr}$

$$\begin{aligned} \text{SO}_2 \text{ absorbido} &= (0.029 \text{ kmol/min})(4.5 \times 10^{-4})(.7)(64 \text{ kg/kmol}) \\ &= 5.84 \times 10^{-4} \text{ kg/min} = 9.13 \times 10^{-6} \text{ kmol/min} \\ &= 2.86 \text{ kg/m}^2.\text{hr} = 0.584 \text{ lb/pie}^2.\text{hr} \end{aligned}$$

$$G' = G' - \text{SO}_2 \text{ absorbido} = 842.5 - 0.584 = 841.92 \text{ lb/pie}^2.\text{hr}$$

$$\begin{aligned} \Delta P/Z &= 1.405 \times 10^{-10} (207) (841.92)^2 / 0.07766 \\ \Delta P/Z &= 0.265 \text{ lb/pie}^2.\text{hr} \end{aligned}$$

La caída de presión total es:

$$\begin{aligned} \Delta P_T &= \Delta P_{\text{empaques seco}} + \Delta P_{\text{empaques húmedo}} \\ \Delta P/Z &= (0.265 + 0.5) = 0.765 \text{ plg H}_2\text{O/pie de empaque} \end{aligned}$$

Si tomamos en cuenta que la altura empacada de la torre es de 2.4 pies:

$$\Delta P = 1.837 \text{ plg H}_2\text{O}$$

**Cálculo del % estimado de inundación:**

Con la abscisa de 0.297, se lee en el Apéndice K, la ordenada correspondiente en la línea de inundación como 0.067. De aquí:

$$\begin{aligned} \% \text{ inundación} &= (100) 0.0335 / 0.067 \\ \% \text{ inundación} &= 50 \% \end{aligned}$$

Puesto que la inundación representa la condición de capacidad máxima para una columna empacada, el hecho de haber obtenido un 50 % aproximado de inundación, significa que la torre, bajo las condiciones señaladas, trabaja a la mitad de su capacidad total.

Con la misma abscisa de 0.297, se busca la ordenada correspondiente a la línea B del Ap. M, y se encuentra que ésta es muy cercana a la de operación (0.0335), lo cual indica que se está trabajando a condiciones óptimas de carga.

De acuerdo a los valores encontrados de  $\Delta P$ , % de inundación y condiciones de carga, se acepta el D.I. de 12.5 cm como adecuado.