



Universidad de Chile
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Departamento de Ingeniería Química

Guía Absorción control 2 IQ46B 2004

Rodrigo Caro E. ¹

¹ Dudas o reclamos a rcaro@ing.uchile.cl

Absorción.

Resistencias a la transferencia de masa.

PROBLEMA 1.

En un estudio experimental de absorción de amoníaco en agua en una columna de paredes mojadas, el valor de K_G se ha encontrado en $0.205 \text{ mol NH}_3 / \text{hr ft}^2 \text{ atm}$. En un punto de la columna el gas contiene un 8% molar de NH_3 y la concentración en la fase líquida es $0.004 \text{ mol NH}_3 / \text{ft}^3$ de solución. La temperatura del sistema es 68°F y la presión total es de una atmósfera. En estas condiciones la constante de la ley de Henry del sistema es $0.15 \text{ atm / (mol NH}_3/\text{ft}^3)$. Si un 85% de la resistencia total a la transferencia de masa se encuentra en la fase gaseosa, calcule los coeficientes interfaciales de transferencia y la composición de ambas fases en la interfase.

Solución problema 1

La resistencia total a la transferencia de masa en ambas fases, se puede calcular utilizando el valor de K_G , de esta forma:

$$R_T = \frac{1}{K_G} = \frac{1}{0,205} = 4,87$$

como la resistencia en la fase gaseosa es el 85% del total, entonces $1/k_G$ es un 85% de R_T , por lo tanto:

$$1/k_G = 0,85 \times 4,87 = 4,13$$

$$k_G = 1/(4,13) = 0,242$$

El coeficiente de la fase líquida, k_L , es evaluado como sigue:

$$\frac{1}{K_G} = \frac{1}{k_G} + \frac{m}{k_L}$$

$$4,87 = 4,13 + \frac{m}{k_L} \quad \Rightarrow \quad \frac{m}{k_L} = 0,74$$

$$k_L = m / 0,74 = 0,15 / 0,74 = 0,212.$$

En el punto considerado de la columna, la concentración bulk de cada fase son:

$$p_{AG} = y_A \times P = 0,08 \times 1 = 0,08 \text{ atm}$$

$$c_{AL} = 0,004 \text{ mol NH}_3/\text{ft}^3 \text{ soln.}$$

Considerando la constante de la ley de Henry, la presión parcial en el equilibrio con la concentración de la fase líquida será:

$$p_A^* = H \times C_{AL} = 0,15 \times 0,004 = 0,0006 \text{ atm}$$

El flujo másico será entonces: $N_{Az} = K_G (p_{AG} - p_A^*)$

$$N_{Az} = 0,205 \times (0,08 - 0,0006)$$

$$N_{Az} = 1,63 \times 10^{-2} \text{ mol/hr/ft}^2$$

La composición interfacial se puede determinar utilizando las siguientes expresiones:

$$N_{Az} = k_G (p_{AG} - p_{Ai}), \text{ entonces}$$

$$1,63 \times 10^{-2} = 0,242 \times (0,08 - p_{Ai})$$

$$p_{Ai} = 0,0127 \text{ atm.}$$

$$N_{Az} = k_L (c_{Ai} - c_{AL})$$

$$1,63 \times 10^{-2} = 0,212 \times (c_{Ai} - 0,004)$$

$$c_{Ai} = 0,083 \text{ mol NH}_3/\text{ft}^3 \text{ soln.}$$

Calculo de flujo mínimo y curva de operación.

PROBLEMA 2.

Se desea bajar hasta un 1% en volumen el contenido de amoníaco de una corriente de 50 [m³/min] de aire que contiene un 10% en volumen de NH₃. Para cumplir este objetivo se utiliza una columna de absorción de 1.5 [m²] de área transversal en la cual se coloca en contacto en contracorriente el flujo de aire a purificar con una corriente de agua pura. Se conoce que el peso molecular de la corriente de aire es de 30 [g/mol] y la densidad de ésta es de 1.2 [Kg/m³].

Calcular:

- La razón mínima de flujo $(L/G)_{\min}$ y el flujo mínimo de agua en la columna.
- La cantidad de agua necesaria si se utiliza 1.5 veces el flujo mínimo de agua.
- La fracción molar de amoníaco en el agua de salida de la columna.
- La altura de la columna necesaria.

Se sabe además que para el sistema descrito se cumple la ley de Henry de la siguiente manera: $Y = 0.98 * X$ y que $K_Y * a = 90$ [Kmol / (hr*m³)]

SOLUCIÓN

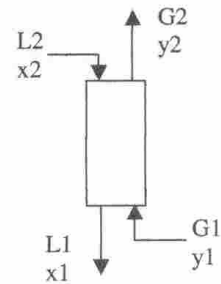
El primer paso es transformar el flujo volumétrico de aire en flujo molar:

$$G_m = 50 \text{ [m}^3\text{/min]} * 1.2 \text{ [Kg/m}^3\text{]} / 30 \text{ [Kg/Kmol]} = 2 \text{ [Kmol/min]}$$

$$G_s = G_m / A = 1.33 \text{ [Kmol/m}^2\text{min]}$$

Utilizando la conversión: $Y = y / (1 - y)$

$$\begin{array}{l} y_1 = 0.1 \\ y_2 = 0.01 \\ x_2 = 0 \end{array} \quad \left\{ \begin{array}{l} Y_1 = 0.11 \\ Y_2 = 0.01 \\ X_2 = 0 \end{array} \right.$$



$$G' = G_s (1 - y_1) = 1.2 \text{ [Kmol/m}^2\text{min]}$$

$$\text{a) Balance de Masa Global: } G' (Y_1 - Y_2) = L' (X_1 - X_2)$$

$$(L'/G')_{\min} = (Y_1 - Y_2) / (X_1^* - X_2)$$

X_1^* : punto de equilibrio con Y_1 , se obtiene a partir de la ecuación de Henry.

$$X_1^* = 0.11 / 0.98 = 0.112$$

$$(L'/G')_{\min} = (0.11 - 0.01) / (0.112 - 0) = 0.893$$

$$L'_{\min} = G' * 0.893 = 1.0716 \text{ [Kmol/m}^2\text{min]}$$

b) Se usa 1,5 veces el mínimo de agua.

$$L' = 1.5 * 1.0716 = 1.607 \text{ [Kmol/m}^2\text{min]}$$

$$L = L' * A * PM_{(H_2O)} = 43.4 \text{ [lt/min]}$$

$$c) G'(Y_1 - Y_2) = L'(X_1 - X_2)$$

$$X_1 = X_2 + (G'/L') * (Y_1 - Y_2)$$

$$X_1 = 0 + (1.2 / 1.607) * (0.11 - 0.01) = 0.0747$$

$$x_1 = X_1 / (1 + X_1) = 0.0695$$

d) Utilizando la siguiente expresión se obtiene la altura de la columna:

$$z = \frac{G'}{K_{ya}} \int_{Y_2}^{Y_1} \frac{dY}{(Y - Y^*)}$$

$$z = 1.2 * 60 / 90 * \text{INT.} = 0.8 * \text{INT.}$$

La integral (INT) la resolveremos numéricamente.

Y _i	X _i	Y _i *	Y - Y*	1 / (Y - Y*)
0.01	0	0	0.01	100
0.03	0.015	0.015	0.015	66.67
0.05	0.03	0.029	0.021	47.62
0.07	0.045	0.044	0.026	38.46
0.09	0.06	0.059	0.031	32.26
0.11	0.075	0.074	0.036	27.78

Se asigna un mallado en el intervalo de integración (Y_i).

Se calcula X_i a partir de la curva de operación (Balance de Masa Global).

Se calcula Y_i* a partir de X_i* y la curva de equilibrio (ecuación de Henry).

Si calculamos el área por el método de los trapecios, se obtiene lo siguiente:

$$\text{Area} = \sum a_i ; \text{ donde } a_i = (z_i + z_{i+1}) / 2 * (Y_{i+1} - Y_i)$$

$$z_i = 1 / (Y_i - Y_i^*)$$

z_i	a_i
100	1.6667
66.67	1.1429
47.62	0.8608
38.46	0.7072
32.26	0.6004
27.78	

Area Total = 4.978

Luego $Z = 0.8 * 4.978 = 3.98$ [m].

PROBLEMA 3.

Se desea diseñar una torre empacada para la absorción de SO_2 en agua desde una mezcla de aire- SO_2 en una torre en contracorriente a 68°F y 2 atm.

La corriente de entrada es de $1540 \text{ ft}^3/\text{hr}$ de gas (aire- SO_2) con concentración de entrada de 3.52% v/v, y de salida 1.29% v/v.

Para cumplir este objetivo se utiliza una columna de absorción de $1.5 \text{ [ft}^2\text{]}$ de área transversal. Y un flujo de agua pura en contracorriente

Para este sistema se dispone de la siguiente información de equilibrio:

Presión parcial SO_2 , mm Hg	0.07	1.07	10.6	25.6	58.4
Concentración SO_2 en agua gr / 100 gr de H_2O	0.01	0.05	0.10	0.50	1.00

- Graficar la curva de equilibrio en las coordenadas Y vs X. (en base inerte)
(1,5 pto)
- Determinar la razón $(L_S/G_S)_{\min}$ que se debe utilizar para el absorbedor.
(1.5pto)
- Si se utiliza una razón (L_S/G_S) 37% superior a la mínima, determinar la concentración de salida del flujo líquido y graficar la curva de operación del absorbedor. **(1pto)**
- Grafique la curva de operación y de equilibrio (en base inerte) si se utiliza una razón (L_S/G_S) 37% superior a la mínima **(0,5pto)**
- Calcular la altura de la torre por integración directa. si se utiliza una razón (L_S/G_S) 37% superior a la mínima. Utilice $K_{Ga} = 100 \text{ [mol / hr ft}^3 \text{ Atm]}$
(1.5pto)

Nota:

- El peso molecular del SO₂ y del H₂O es de 64 y 18 [lb/lbmol] respectivamente.
- El peso molecular de la corriente de aire es de 30 [lb/lbmol] y la densidad de ésta es de 74.91[lb/ft³].
- Puede ser recomendable trabajar en unidades inglesas.

Solución problema 3

a) Primero se debe calcular x e y. Para esto debemos transformar las unidades de composición masica en unidades molares, a modo de ejemplo:

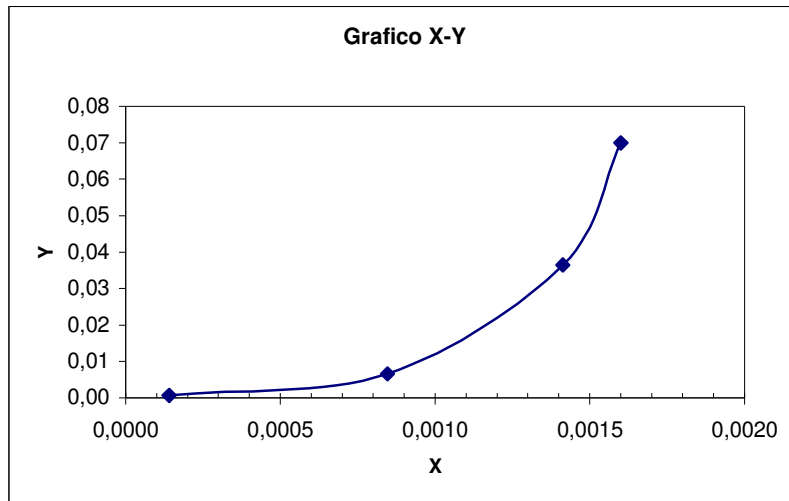
$$x = \frac{\frac{0.3 \text{ gr SO}_2}{\frac{99.7}{18} + \frac{0.3}{64}}}{\frac{\text{Pm SO}_2}{100 \text{ gr Soln}}} = 0.000846$$

Por otra parte la fracción y se obtiene como $y = \frac{p_i}{P_{total}}$

Además utilizando la conversión $Y_1 = y_1 / (1-y_1)$ y $X_1 = x_1 / (1-x_1)$, se puede obtener la siguiente tabla:

Concentración SO ₂ en agua gr / 100 gr de H ₂ O	Presión parcial SO ₂ , mm Hg	x [molSO ₂ / moltotal]	y [molSO ₂ /molto tal]	X [molSO ₂ /mol H ₂ O]	Y [molSO ₂ /mol H ₂ O]
0,0500	1,0700	0,0001	0,0007	0,0001	0,0007
0,3000	10,0000	0,0008	0,0066	0,0008	0,0066
0,5000	26,7520	0,0014	0,0176	0,0014	0,0179

De esta forma se obtiene el siguiente grafico



b) La razón $(L_S/G_S)_{\min}$ se obtiene a partir de la ecuación siguiente

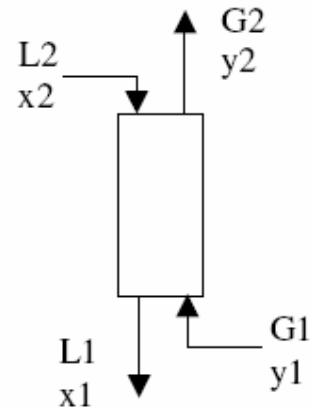
$$(L'/G')_{\min} = (Y_1 - Y_2) / (X_1^* - X_2)$$

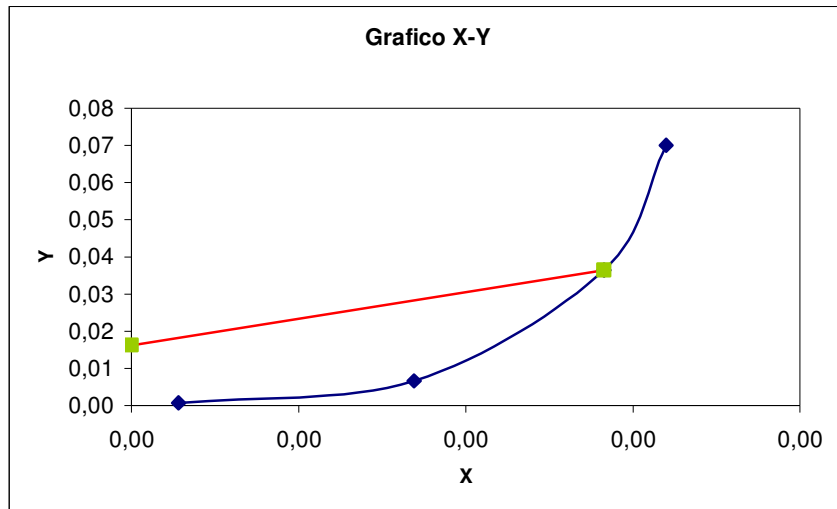
Donde X_1^* : punto de equilibrio con Y_1

Reemplazando se obtiene que:

$$X_1 = 0,001$$

Lo cual se puede ver gráficamente:





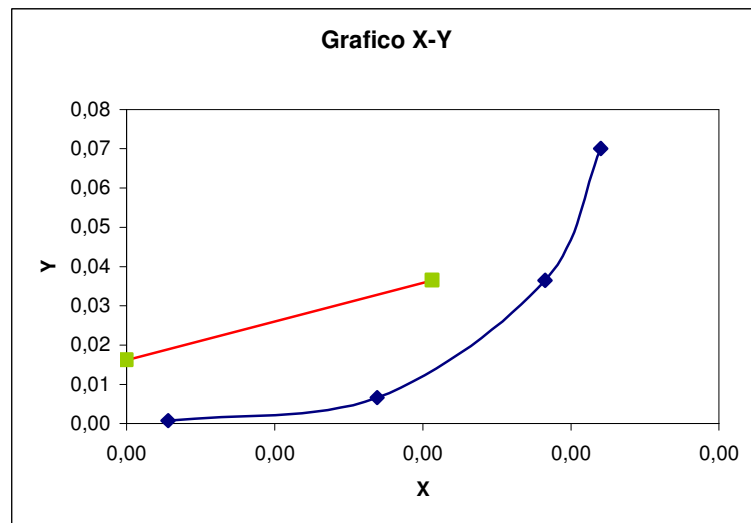
Luego $L'/G'_{\min} = 14.38$

c) $1,37(L'/G')_{\min} = 19.7$

Como Y_1, Y_2 y X_2 se mantienen constantes con respecto a la parte anterior, se deduce que:

$$X_1 = X_2 + \frac{(Y_1 - Y_2)}{19.7} = 0.00103$$

Esto se ve gráficamente en la siguiente figura



d) Para esta parte se utiliza la siguiente formula:

$$z = \frac{G_S}{K_Y a} \int_{Y_{A1}}^{Y_{A2}} \frac{dY_A}{Y_A - Y_A^*}$$

Antes de resolver la integral calculemos G_S y $K_Y a$

$G_{\text{masico}} = G_{\text{volumetrico}} * \text{densidad} / \text{peso molecular del flujo}$

$G_S = G_m / A$

$$\Rightarrow G_S = 2563.65$$

Por otra parte $K_Y a = K_{Ga} * P = 200$

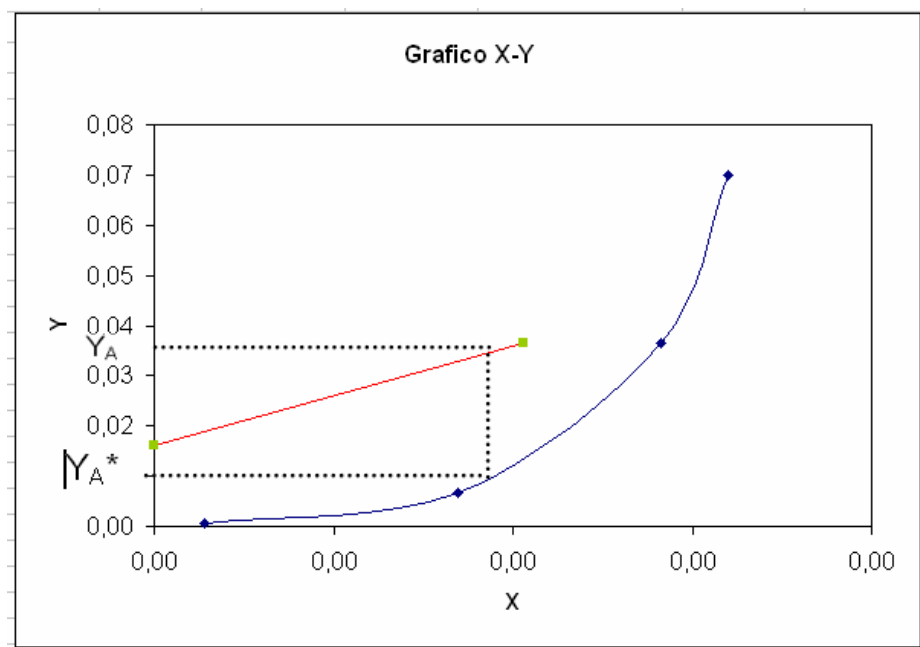
Ahora podemos resolver la integral, para esto por simplicidad y por tiempo, solo se pide particionar el intervalo de integración en solo 2 espacios.

Con esto se puede construir la siguiente tabla:

Y_A	Y_A^*	$Y_A - Y_A^*$	$1 / (Y_A - Y_A^*)$
0,0162	0	0,0162	61,72839506
0,0263	0,0079887	0,0184	54,48584113
0,0365	0,0206671	0,0158	63,22266149

Con lo cual se obtiene que $z = 23.32$

Nota: Y^* se calcula siguiendo este método



Cálculo de volúmenes de reactores.

Problema 4.

Se debe disolver CO_2 en una solución usando un absorbedor por burbujeo. Para ello se dispone de un tanque cerrado de absorción de dióxido de carbono que opera a 30 atm de presión y temperatura de 18°C . Se debe agregar CO_2 hasta alcanzar una concentración de 20 gr de CO_2 por litro de solución, siendo la concentración de entrada 0. El CO_2 se alimenta puro de modo que se puede considerar que la solución esta en contacto con una fase gaseosa de composición 100% dióxido de carbono. Determine el volumen del reactor sabiendo que el flujo de solución es de 1 [lt/s]. Suponga que el tanque opera como un reactor perfectamente agitado.

$$K_L a = 0.01 \text{ [1/s]}$$

Para el equilibrio entre la solución y la atmósfera de CO_2 considere los siguientes datos de equilibrio.

TABLE 2-125 Carbon Dioxide (CO_2)

Total pressure, atm	Weight of CO_2 per 100 weights of H_2O^*								
	12°C	18°C	25°C	31.04°C	35°C	40°C	50°C	75°C	100°C
25		3.86		2.80	2.56	2.30	1.92	1.35	1.06
50	7.03	6.33	5.38	4.77	4.39	4.02	3.41	2.49	2.01
75	7.18	6.69	6.17	5.80	5.51	5.10	4.45	3.37	2.82
100	7.27	6.72	6.28	5.97	5.76	5.50	5.07	4.07	3.49
150	7.59	7.07		6.25	6.03	5.81	5.47	4.86	4.49
200				6.48	6.29	6.28	5.76	5.27	5.08
300	7.86	7.35					6.20	5.83	5.84
400	8.12	7.77	7.54	7.27	7.06	6.89	6.58	6.30	6.40
500				7.65	7.51	7.26			
700							7.58	7.43	7.61

*In the original, concentration is expressed in cubic centimeters of CO_2 (reduced to 0°C and 1 atm) dissolved in 1 g of water.

Solución problema 4.

De acuerdo con la información de equilibrio disponible a 18°C se tiene que a 25 atm la solubilidad es 3.86 y a 50 atm es 6.33 gr CO₂ / 100 gr H₂O. Interpolando linealmente para 30 atm se tiene una solubilidad de 4.354 gr CO₂ / 100 gr H₂O.

$$C^* = \frac{4.354 \text{ gr CO}_2}{100 \text{ gr H}_2\text{O}} = \frac{4.354 \text{ gr CO}_2}{104.354 \text{ gr Soln.}} = \frac{41.7 \text{ gr CO}_2}{\text{lt soln}}$$
, al considerar una densidad de la solución de 1 gr/ml.

En el interior del absorbedor la concentración de CO₂ es de 20 gr/lt, en consecuencia la velocidad de transferencia de masa se puede expresar como:

$$W_a = K_L a^* (C^* - C) * V = \frac{0.01}{\text{seg}} * \left(\frac{41.7 \text{ gr}}{\text{lt}} - \frac{20 \text{ gr}}{\text{lt}} \right) * V \text{ (lt)}$$

$$W_a = 0.217 [\text{gr/seg/lt}] * V [\text{lt}]$$

Por otro lado el requerimiento de absorción para el equipo es que para un flujo de 1 lt/seg se pase de concentración 0.0 a 20.0 gr/lt de CO₂.

$$\text{Por lo tanto: } W_a = 1 [\text{lt/seg}] * (20.0 - 0.0) [\text{gr/lt}] = 20 [\text{gr/seg}]$$

Igualando ambas expresiones se obtiene:

$$W_a = 20 [\text{gr/seg}] = 0.217 [\text{gr/seg/lt}] * V [\text{lt}]$$

$$\Rightarrow V = 92.17 [\text{lt}]$$

Calculo de alturas por metodo de integración.

Problema 5.

Se debe absorber amoníaco desde una corriente de aire a 68 [°F] y una atmósfera de presión, utilizando una torre empacada de 6.07 [in] de diámetro y flujo en contracorriente. El absorbente es agua libre de amoníaco. El flujo de gas de entrada es 1 [mol de aire / min] y el flujo de agua es 1.39 [mol / min]. En estas condiciones el coeficiente global de transferencia de masa K_{GA}*P, puede ser asumido como 100 [mol / hr ft³]. La concentración de amoníaco debe ser reducida desde 0.0825 a 0.003 en fracción molar. Suponga que en estas condiciones se cumple la ley de Henry “y = 0.185 x”.

Determine la altura necesaria de la torre para cumplir los requerimientos (suponga que tanto la curva de operación como la curva de equilibrio son aproximadamente rectas).

$$\text{PM Amoníaco} = 17 [\text{g/mol}]$$

Solución problema 5.

El área transversal de la torre se puede calcular como:

$$A = \frac{\pi \times D^2}{4} = \frac{\pi \left(\frac{6.07}{12} \right)^2}{4} = 0.201 \text{ ft}^2$$

Para la fase gaseosa sabemos que:

$$y_1 = 0.0825; \quad y_2 = 0.003;$$

$$G = (1 \text{ mol} / \text{min}) / (0.201 \text{ ft}^2) = 5.03 \text{ mol} / \text{min-ft}^2$$

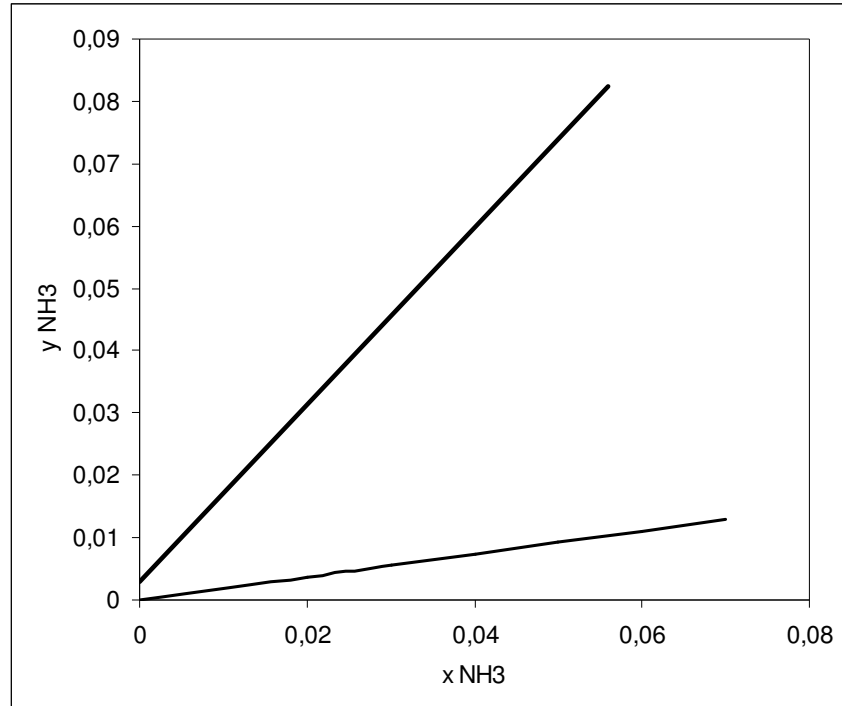
$$Y_1 = 0.09; \quad Y_2 = 0.003;$$

$$G_S = G \times (1 - y_1) = 4.7 \text{ mol} / \text{min-ft}^2$$

Para la fase líquida:

$$x_2 = 0.00; \quad X_2 = 0.00;$$

$$L_S = (1.39 \text{ mol} / \text{min}) / (0.201 \text{ ft}^2) = 6.91 \text{ mol} / \text{min-ft}^2$$



Realizando un balance de masa global para el equipo:

$$L_S (X_2 - X_1) = G_S (Y_2 - Y_1)$$

Obtenemos la concentración en la fase líquida a la salida: $X_1 = 0.059$ $x_1 = X_1 / (1 + X_1) = 0.056$

Para calcular la altura necesaria de la torre como podemos suponer que tanto la curva de operación como la curva de equilibrio son rectas, utilizamos la siguiente expresión:

$$z = \frac{G}{K_G a^* P} \frac{y_{A1} - y_{A2}}{(y_A - y_A^*)_{\ln}}$$

donde:

$$(y_A - y_A^*)_{\ln} = \frac{(y_A - y_A^*)_1 - (y_A - y_A^*)_2}{\ln \left[\frac{(y_A - y_A^*)_1}{(y_A - y_A^*)_2} \right]}$$

es necesario calcular las concentraciones de equilibrio en la fase gaseosa asociada a la composición de la fase líquida a la entrada y la salida de la torre:

$$y_2^* = 0.185 * x_2 = 0.185 * 0.000 = 0.000$$

$$y_1^* = 0.185 * x_1 = 0.185 * 0.056 = 0.0104$$

$$(y_1 - y_1^*) = 0.0825 - 0.0104 = 0.0721$$

$$(y_2 - y_2^*) = 0.0030 - 0.000 = 0.0030$$

$$(y - y^*)_{\ln} = 2.17 * 10^{-2}$$

finalmente:

$$z = \frac{G}{K_G a^* P} \frac{y_{A1} - y_{A2}}{(y_A - y_A^*)_{\ln}} = \frac{301.8}{100} * \frac{0.0825 - 0.0030}{0.0217}$$

$$z = 11.06 \text{ ft.}$$

Concentración media logarítmica.

PROBLEMA 6

Para el mismo sistema del problema 5, se debe calcular la altura de la torre por integración directa. Utilice $K_{Ya} = 4.6 \text{ [mol / hr ft}^3 \Delta Y_{\text{NH}_3}]$ y considere la siguiente información de equilibrio.

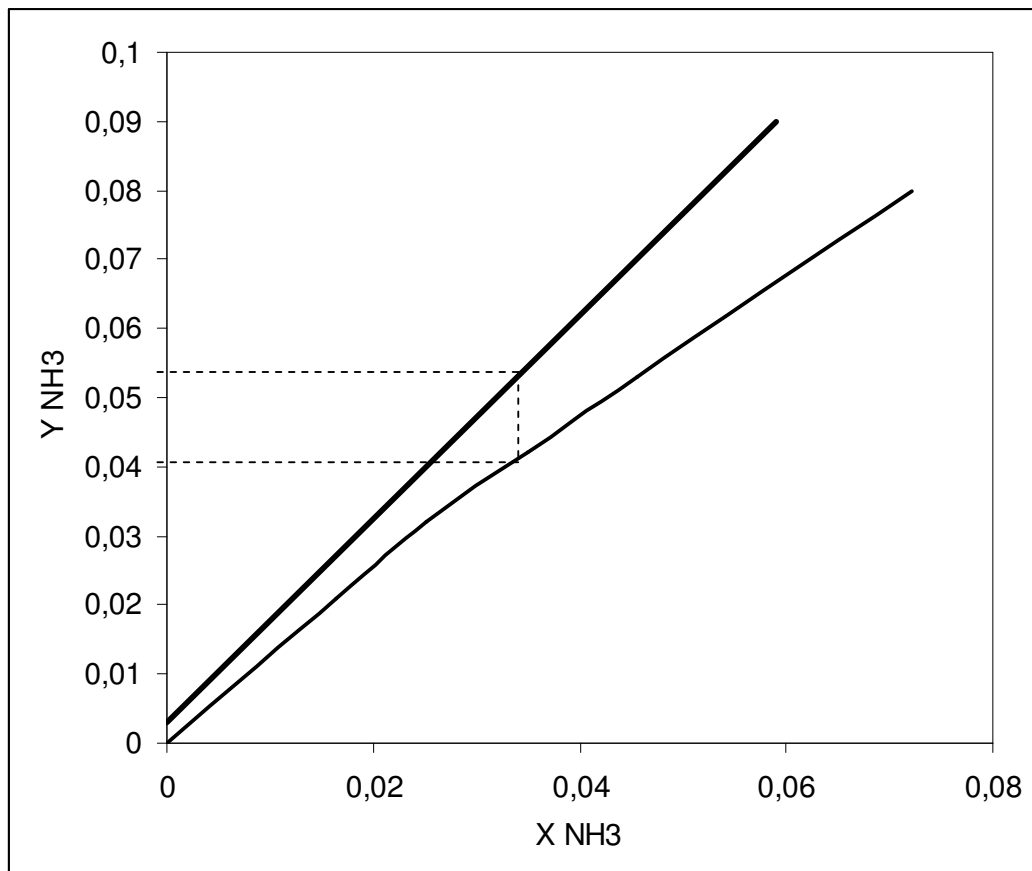
X [mol NH ₃ / mol H ₂ O]	0.0164	0.0252	0.0455	0.0722
Y [mol NH ₃ / mol aire]	0.0210	0.0320	0.0530	0.0800

Solución problema 6

En este caso debemos calcular la altura de la torre utilizando:

$$z = \frac{G_S}{K_Y a} \int_{Y_{A1}}^{Y_{A2}} \frac{dY_A}{Y_A - Y_A^*}$$

Lo primero que debemos hacer en este caso es construir una el gráfico que representa las condiciones de operación y la curva de equilibrio del sistema.



De esta figura se obtienen los valores de Y^* para cada valor de Y y se construye la siguiente tabla:

Y_A	Y_A^*	$Y_A - Y_A^*$	$1 / (Y_A - Y_A^*)$
0.003	0.0000	0.0030	333.3
0.010	0.0065	0.0035	296.0
0.020	0.0153	0.0047	212.5
0.035	0.0275	0.0075	133.3
0.055	0.0425	0.0125	80.0
0.065	0.0503	0.0147	68.0
0.075	0.0508	0.0170	58.9
0.090	0.0683	0.0217	47.6

Luego es posible evaluar el número de unidades de transferencia utilizando la integral respectiva.

$$NTU = \int_{Y_{A1}}^{Y_{A2}} \frac{dY_A}{Y_A - Y_A^*} = 10,95$$

Finalmente se obtiene:

$$Z = 4,70 / 4,60 \times 10,95 = 11,2 \text{ ft.}$$

PROBLEMA 7

Se debe absorber amoníaco desde una corriente de aire a 68°F y presión atmosférica, utilizando una torre empacada de 6.07 in de diámetro y flujo en contracorriente. El absorbente es agua libre de amoníaco. El flujo de gas de entrada es 4.7 moles de aire / min y el flujo de agua es 1.39 mol/min. En estas condiciones el coeficiente global de transferencia de masa $K_G a^* P$, puede ser asumido como 5.00 mol / hr ft³. La concentración de amoníaco debe ser reducida desde 0.0825 a 0.003 en fracción molar.

Suponga que en estas condiciones se cumple la ley de Henry: $y^* = 0,185 x$

Determine la altura necesaria de la torre para cumplir los requerimientos. (Suponga que tanto la curva de operación como la curva de equilibrio son aproximadamente rectas y que G puede ser aproximado a G_s).

P.M. Amoníaco: 17 gr / mol.

Utilice la siguiente expresión:

$$z = \frac{G}{K_G a^* P} \frac{y_{A1} - y_{A2}}{(y_A - y_A^*)_{\ln}} \quad \text{con} \quad (y_A - y_A^*)_{\ln} = \frac{(y_A - y_A^*)_1 - (y_A - y_A^*)_2}{\ln \left[\frac{(y_A - y_A^*)_1}{(y_A - y_A^*)_2} \right]}$$

Solución problema 7

Para la fase gaseosa sabemos que:

$$y_1 = 0.0825; \quad y_2 = 0.003; \quad G_S = 4.7 \text{ mol / min}$$

$$Y_1 = 0.09; \quad Y_2 = 0.003;$$

para la fase líquida:

$$x_2 = 0.00; \quad X_2 = 0.00; \quad L_S = 1.39 \text{ mol / min}$$

Realizando un balance de masa global para el equipo:

$$L_S (X_2 - X_1) = G_S (Y_2 - Y_1)$$

Obtenemos la concentración en la fase líquida a la salida:

$$X_1 = 0.294 \quad x_1 = X_1 / (1 + X_1) = 0.227$$

Se supone que G varía poco a lo largo de la torre y es idéntico a G_S . En términos del área transversal de la torre, se tiene:

$$A = 0.201 \text{ ft}^2$$

$$G = 1403 \text{ mol / hr ft}^2$$

Para calcular la altura necesaria de la torre como podemos suponer que tanto la curva de operación como la curva de equilibrio son rectas, utilizamos la siguiente expresión:

$$z = \frac{G}{K_G a^* P} \frac{y_{A1} - y_{A2}}{(y_A - y_A^*)_{\ln}} \quad \text{donde:}$$

$$(y_A - y_A^*)_{\ln} = \frac{(y_A - y_A^*)_1 - (y_A - y_A^*)_2}{\ln \left[\frac{(y_A - y_A^*)_1}{(y_A - y_A^*)_2} \right]}$$

es necesario calcular las concentraciones de equilibrio en la fase gaseosa asociada a la composición de la fase líquida a la entrada y la salida de la torre:

$$y_2^* = 0.185 * x_2 = 0.185 * 0.000 = 0.000$$

$$y_1^* = 0.185 * x_1 = 0.185 * 0.227 = 0.042$$

$$(y_1 - y_1^*) = 0.0825 - 0.042 = 0.0405$$

$$(y_2 - y_2^*) = 0.0030 - 0.000 = 0.0030$$

$$(y - y^*)_{\ln} = 1.441 \cdot 10^{-2}$$

finalmente:

$$z = \frac{G}{K_G a^* P} \frac{y_{A1} - y_{A2}}{(y_A - y_A^*)_{\ln}} = \frac{23.39}{5.00} \cdot \frac{0.0825 - 0.0030}{0.01441}$$

$$z = 1548 \text{ ft.}$$

Cálculo número de etapas.

PROBLEMA 8

Para el secado de aire húmedo se emplea una torre de absorción de relleno que opera en contracorriente utilizando como líquido absorbente una disolución de sosa cáustica de 1 mol de agua / mol de NaOH. El aire entra con humedad absoluta de 0,019 mol de agua / mol aire seco, y ha de deshumificarse hasta 0,0048 mol de agua / mol aire seco. Calcúle el numero de etapas de contacto necesarias, si la eficiencia de cada etapa es un 80% y se utiliza un flujo 50% superior al mínimo.

La curva de equilibrio puede ser modelada como $Y=0.00039 \cdot X^2$

Solución problema 8

Las humedades molares del aire a la entrada y a la salida son:

$$Y_1 = 0.01933 \text{ mol de agua / mol aire seco}$$

$$Y_2 = 0.00483 \text{ mol de agua / mol aire seco}$$

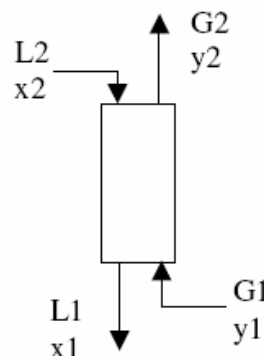
Para la disolución líquida, en la entrada la razón molar es 1/1 entre agua y NaOH, es decir:

$$X_2 = 1 \text{ mol de agua / mol de NaOH.}$$

Utilizando los datos de la curva de equilibrio y la información de las concentraciones en base inerte, determinamos la razón mínima líquido / Gas en la columna a partir de la formula:

$$(L'/G')_{\min} = (Y_1 - Y_2) / (X_1^* - X_2)$$

Donde X_1^* : punto de equilibrio con Y_1



Reemplazando se obtiene que:
 $X_1^* = 7$ mol de agua / mol de NaOH

$$(L_s / G_s)_{\min} = 0.0025$$

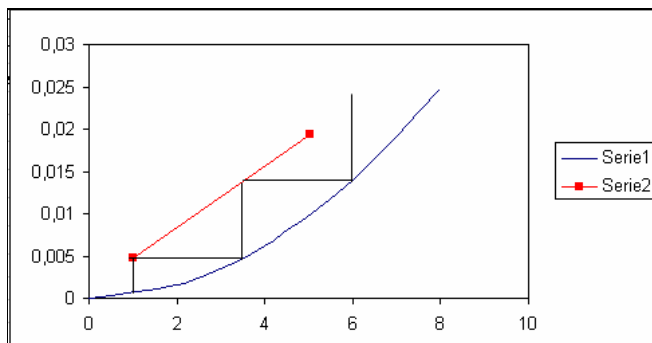
como la operación se realiza con un flujo líquido 50% superior al mínimo, entonces la razón de operación será:

$$(L_s / G_s) = 0.0036$$

Realizando un balance de masa para la operación se tiene que:

$L_s (X_2 - X_1) = G_s (Y_2 - Y_1)$ en consecuencia $X_2 = 5.02$ y determinamos gráficamente el número de etapas teóricas necesarias.

El número de etapas teóricas es 2.6, como la eficiencia de cada etapa es un 80%, entonces el número de etapas necesarias será 4.



PROBLEMA 9

Para el secado de aire húmedo se emplea una torre de absorción de relleno utilizando como líquido absorbente una disolución de sosa cáustica de 50% molar. El aire entra con humedad absoluta de 0,012 Kg de agua /Kg de aire seco, y ha de deshumificarse hasta 0,003 Kg de agua / Kg de aire seco. Calcúlese el

numero de etapas de contacto discontinuo necesarias, si la eficiencia de cada etapa es un 40% y se utiliza un flujo líquido 50% superior al mínimo.

X	Y	X	Y
0	0	7	0.0142
1	0.0004	8	0.0157
2	0.0011	9	0.0170
3	0.0028	10	0.0177
4	0.0067	12	0.0190
5	0.0100	16	0.0202
6	0.0126		

P.M. Agua: 18 gr/mol; P.M. Aire: 29 gr/mol.

Solución problema 9

Las humedades molares del aire a la entrada y a la salida son:

$$Y_1 = 0.012 \text{ Kg agua / Kg aire seco} =$$

$$= 0,012 \cdot 29 / 18 = 0.01933 \text{ mol de agua / mol aire seco}$$

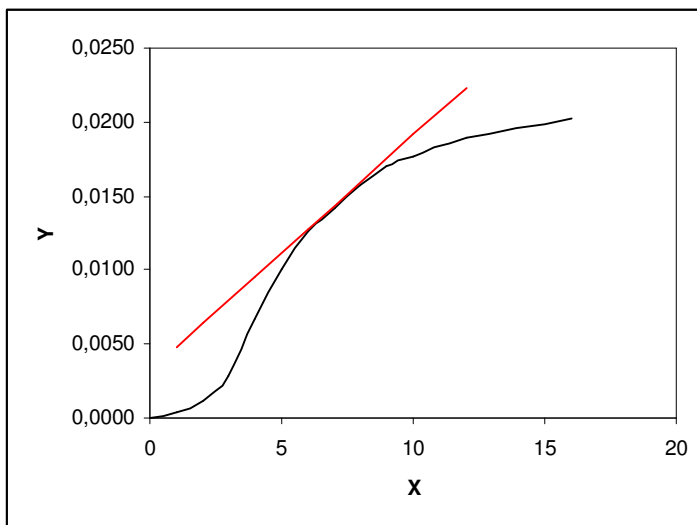
$$Y_2 = 0.003 \text{ Kg agua / Kg aire seco} =$$

$$= 0,003 \cdot 29 / 18 = 0.00483 \text{ mol de agua / mol aire seco}$$

Para la disolución líquida, en la entrada la razón molar es 1/1 entre agua y NaOH, es decir:

$$X_1 = 1 \text{ mol de agua / mol de NaOH.}$$

Utilizando los datos de la curva de equilibrio y la información de las concentraciones en base inerte, determinamos gráficamente la razón mínima líquido / Gas en la columna.



Como la curva de equilibrio presenta una geometría especial, no es posible alcanzar el equilibrio para el punto de salida ($Y = 0.01933$) sin cruzar antes la curva de equilibrio en consecuencia la razón mínima se fija para la recta tangente a la curva de equilibrio que pasa por el punto (X_1, Y_1).

Se obtiene que:

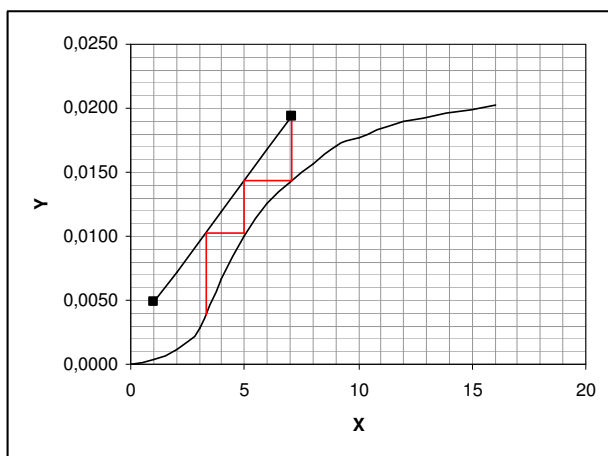
$$(L_s / G_s)_{\min} = 0.00159$$

como la operación se realiza con un flujo líquido 50% superior al mínimo, entonces la razón de operación será:

$$(L_s / G_s) = 0.002385$$

Realizando un balance de masa para la operación se tiene que:

$L_s (X_2 - X_1) = G_s (Y_2 - Y_1)$ en consecuencia $X_2 = 7.079$ y determinamos gráficamente el número de etapas teoricas necesarias.



El número de etapas teóricas es 2.84, como la eficiencia de cada etapa es un 40%, entonces el número de etapas necesarias será **8**.

Problema 10

El benceno contenido en una corriente de gas se va a extraer mediante absorción en contracorriente con una solución de aceite de lavado. El flujo de gas seco a tratar (G_s) es 0,01 Kmol / seg y tiene una concentración de benceno de 0,02 Kmol benceno / Kmol gas seco; la que se debe reducir hasta 0,004 Kmol benceno / Kmol gas seco. El aceite de lavado entra con una concentración de 0,02 Kmol benceno / Kmol aceite de lavado.

- Determine el flujo mínimo de aceite con que se puede operar;
- Determine la concentración de benceno en el aceite de salida y el número de etapas necesarias cuando se utiliza un flujo de aceite de $1,8 \times 10^{-3}$ Kmol/seg.

Solución problema 10

Datos parte a)

$$G_s = 0,01 \frac{\text{Kmol gas seco}}{\text{seg}}$$

$$x_0 = 0,02 \text{ Kmol benceno / kmol aceite}$$

$$y_1 = 0,004 \text{ Kmol benceno / kmol gas seco}$$

$$y_0 = 0,02 \text{ Kmol benceno / kmol gas seco}$$

¿ x_1 ?

Balance Global:

$$L_s x_0 + G_s y_1 = L_s x_1 + G_s y_0$$

$$L_s (x_0 - x_1) = - G_s (y_0 - y_1)$$

$$- \frac{L_s}{G_s} = \frac{(y_0 - y_1)}{(x_0 - x_1)} \quad (1)$$

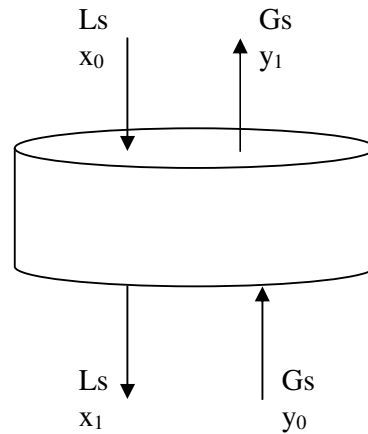
Gráficamente se ve la tangente a la línea de equilibrio (dada en el gráfico), que pasa por el punto (x_0, y_1) y por y_0 (este punto debido a que es absorción en contracorriente).

Del gráfico se obtiene que:

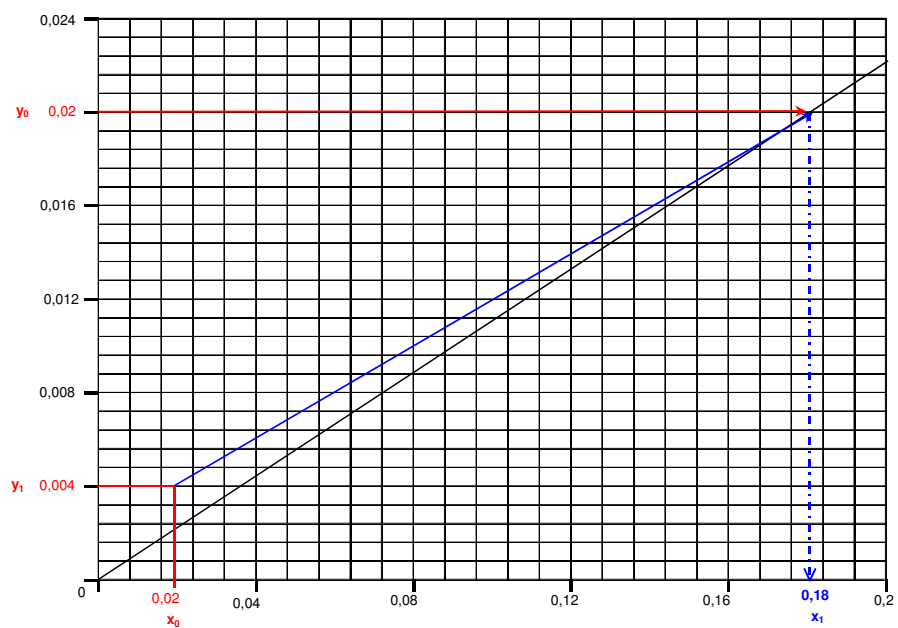
$$x_1 = 0,18 \text{ Kmol benceno / kmol aceite}$$

⇒ reemplazando en (1):

$$L_s = 0,001 \text{ Kmol aceite / seg.}$$



Solución gráfica parte a)



Datos parte b)

$$G_s = 0,01 \frac{\text{Kmol gas seco}}{\text{seg}}$$

$$L_s = 1,8 * 10^{-3} \frac{\text{Kmol aceite}}{\text{seg}}$$

$$x_0 = 0,02 \text{ Kmol benceno / kmol aceite}$$

$$y_N = 0,004 \text{ Kmol benceno / kmol gas seco}$$

$$y_0 = 0,02 \text{ Kmol benceno / kmol gas seco}$$

¿ x_N ?

¿N (número de etapas)?

Balance Global:

$$L_s x_0 + G_s y_0 = L_s x_N + G_s y_N$$

$$L_s (x_0 - x_N) = - G_s (y_0 - y_N)$$

$$- \frac{L_s}{G_s} = \frac{(y_0 - y_N)}{(x_0 - x_N)} \quad (2)$$

$$- \frac{1,8 * 10^{-3} \text{Kmol aceite / seg}}{0,01 \text{ Kmol gas seco / seg}} = \frac{(0,02 - 0,004) \text{ Kmol benceno / kmol gas seco}}{(0,02 \text{ Kmol benceno / kmol aceite} - x_N)}$$

$$- 0,18 \text{ Kmol aceite} = \frac{(0,02 - 0,004) \text{ Kmol benceno}}{0,02 \text{ Kmol benceno / kmol aceite} - x_N}$$

$$- 0,18 \text{ Kmol aceite} = \frac{0,016 \text{ Kmol benceno}}{0,02 \text{ Kmol benceno / kmol aceite} - x_N}$$

$$\frac{- 0,18 \text{ Kmol aceite}}{0,016 \text{ Kmol benceno}} = \frac{1}{0,02 \text{ Kmol benceno / kmol aceite} - x_N}$$

$$- \frac{0,016 \text{ Kmol benceno}}{0,18 \text{ Kmol aceite}} = 0,02 \text{ Kmol benceno / kmol aceite} - x_N$$

$$- 0,089 \text{ Kmol benceno / Kmol aceite} - 0,02 \text{ Kmol benceno / kmol aceite} = - x_N$$

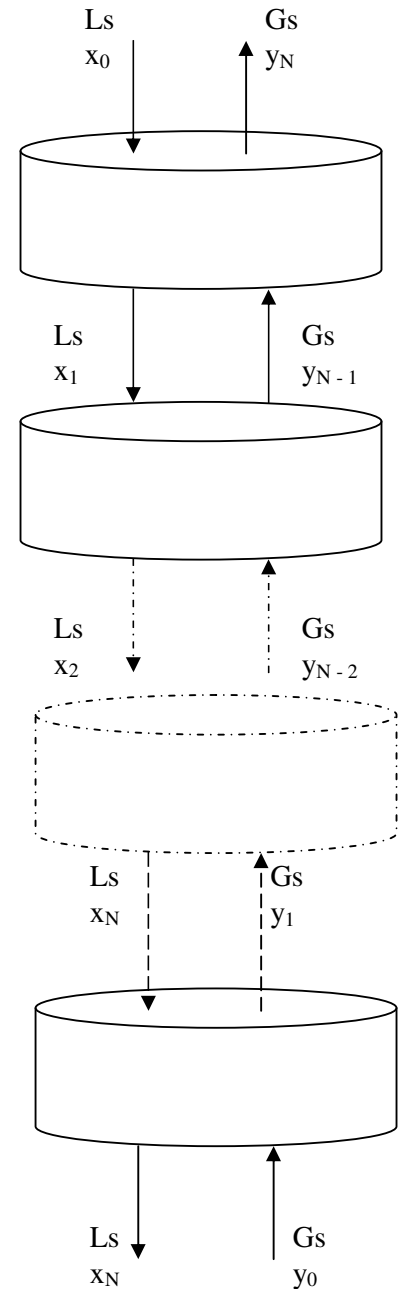
$$x_N = 0,109 \text{ Kmol benceno / Kmol aceite}$$

Con x_N se ingresa al gráfico y se obtiene la línea de equilibrio dada por la recta que pasa por (x_0, y_N) y (x_N, y_0) . Luego, a partir de (x_N, y_0) se trazan líneas hacia la curva de equilibrio y desde ésta hacia la línea de operación; se repite esto hasta cumplir con los requerimientos solicitados (en este caso (x_0, y_N)). Del gráfico se obtiene que:

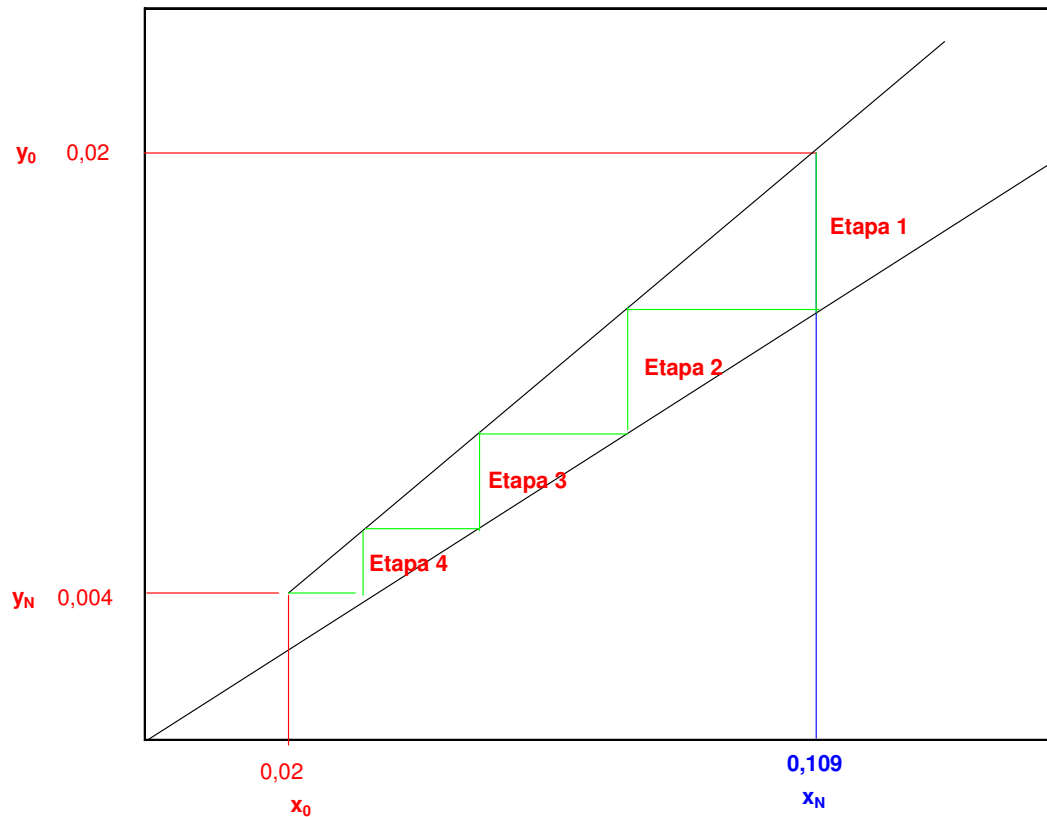
N = 4 etapas.

Nota: Si por aproximaciones les da N distinto a un entero, se debe

aproximar al entero superior, para cumplir con los requerimientos.



Solución gráfica parte b)



PROBLEMA 11

A presión atmosférica la concentración de saturación de oxígeno en agua es de 12 mg/lit. Para procesos oxidativos en soluciones acuosas se requiere que la concentración de oxígeno disuelto sea superior a 10 mg/lit. Conociendo el valor del $K_L a$ del sistema, igual a $5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, calcular el tiempo que se debe mantener la aireación de agua excenta de oxígeno para lograr la concentración deseada.

Solución problema 11

Sabemos que:

$$K_L \cdot a \cdot (C_a^* - C_a^0) = \frac{dC_a}{dt}$$

$$\Rightarrow C_a = C_a^* - (C_a^* - C_a^0) \cdot e^{-K_L a t}$$

$$\Rightarrow t = -\frac{\ln\left(\frac{C_a - C_a^*}{(C_a^0 - C_a^*)}\right)}{K_L a}$$

$$\Rightarrow t = -\frac{\ln\left(\frac{10-12}{(0-12)}\right)}{5 \cdot 10^{-3}} = 358,35 \text{ seg}$$

Preguntas teoricas.

12) Como afecta la solubilidad del soluto al peso relativo de las resistencias en la fase gas y en la líquida.

Solución problema 12

Al aumentar la solubilidad, aumenta el peso relativo de la resistencia en fase gas con respecto a la resistencia en la fase líquida.

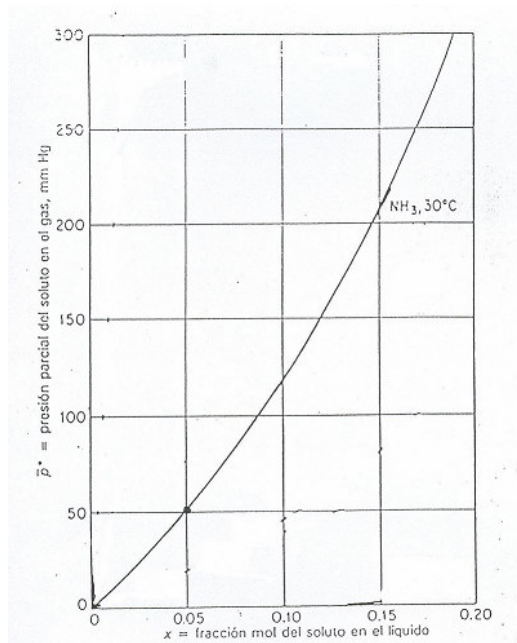
13) Que relación existe entre constante de Henry y solubilidad.

Solución problema 13

Compuestos más solubles poseen una menor constante de Henry. Lo cual se refleja en líneas de equilibrio con una menor pendiente.

14) Dada la composición en el gas de la pregunta 1, ¿Cuál es el rango de composiciones en el líquido que permite que haya absorción o desorción? Justifique gráficamente.

Solución problema 14



Este es el rango de composiciones en el líquido que permite que haya absorción

15) En la absorción de gases en contracorriente explique el sentido físico que presenta la razón $(L/G)_{\min}$ en el diseño de la operación.

16) Para un proceso de absorción en flujo paralelo y en contracorriente (dos etapas). Muestre en un gráfico adecuado:

- las coordenadas que representan la curva de operación
- las concentraciones de entrada y salida de ambos fluidos.
- La fuerza motriz para la transferencia de masa en un punto de operación utilizando un coeficiente global K_G .

Propuestos.

PROBLEMA 17

A una columna de absorción entran $40 \text{ m}^3/\text{hr}$ de una mezcla gaseosa de composición 35% en volumen de amoníaco y 65 % de aire. La absorción se verifica en contracorriente con agua que contiene el 2% en peso de amoníaco, a 20°C y 1 atm, y se ha de recuperar el 90% del amoníaco contenido en la mezcla gaseosa. Calcule la cantidad mínima de agua para la operación. Si se utiliza una cantidad de agua 35% superior a la mínima y se supone una eficiencia de plato de 35%, determine el número de etapas necesarias para la separación.

Datos de equilibrio:

Kg NH_3 / 100 Kg H_2O	Presión de vapor, mm Hg
2	12
5	31.7
10	69.4
15	114
20	166
25	227
30	298

PROBLEMA 18

Se desea desorber amoníaco desde una solución acuosa utilizando una corriente de aire saturado en agua a la temperatura de operación. Para ello se utiliza un equipo de contacto en cocorriente. El flujo de solución de 10 moles por segundo inicialmente contiene un 5% molar de amoníaco y se contacta con aire libre de esta especie. Al terminar el contacto se requiere que el aire tenga menos de un 1% de amoníaco. Suponga que la curva de equilibrio puede ser adecuadamente expresada como $Y = X$. Si se utiliza un flujo de gas tal que L/G es un 30% inferior

al máximo determine la concentración de amoníaco en el gas a la salida del equipo.

PROBLEMA 19

Para la absorción de amoníaco (NH_3) en agua, desde una mezcla de aire-amoníaco en una torre a 60°F y 3 atm, se han estimado los coeficientes individuales de film como: $k_L = 1.1$ [$\text{mol de NH}_3 / (\text{hr ft}^2 \text{ mol NH}_3/\text{ft}^3)$] y $k_G = 0.25$ [$\text{mol NH}_3 / (\text{hr ft}^2 \text{ atm})$]

La presión parcial de equilibrio de una solución diluida de NH_3 en agua se puede estimar según:

$$p_{\text{Ai}} = 0.25 c_{\text{Ai}}$$

donde p_{Ai} esta en atm y c_{Ai} en $\text{mol NH}_3 / \text{ft}^3$ de solución.

Determinar los siguientes coeficientes de transferencia de masa:

- a) k_y
- b) k_c (para el film gaseoso)
- c) K_G
- d) K_L

PROBLEMA 20

A presión atmosférica la concentración de saturación de oxígeno en agua es de 12 mg/lit. Para procesos oxidativos en soluciones acuosas se requiere que la concentración de oxígeno disuelto sea superior a 10 mg/lit. Conociendo el valor del K_{La} del sistema, igual a $5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, calcular el tiempo que se debe mantener la aireación de agua exenta de oxígeno para lograr la concentración deseada.