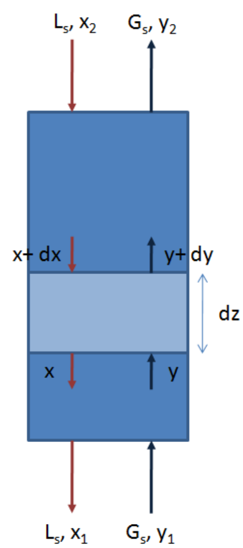
IQ46B - Operaciones de Transferencia I Octubre 29, 2008
Profesor: Tomás Vargas
Auxiliar: Melanie Colet

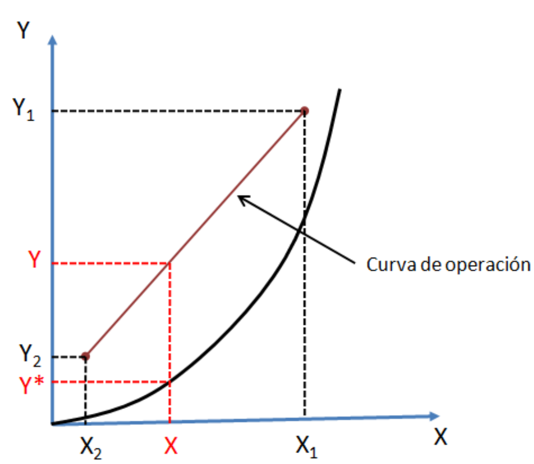
Clase Auxiliar 7.
<u>Absorción</u>: Diseño de Columnas

Para dimensionar columnas de absorción continuas (no como procesos por etapas como los vistos hasta ahora) se realiza un balance diferencial a lo largo del equipo como lo indica la siguiente figura:



En general, para cualquier punto de la columna donde las concentraciones valen: (X, Y), se tiene que:

$$\frac{L_S}{G_S} = \frac{Y_1 - Y}{X_1 - X}$$



Si consideramos que los coeficientes de transferencia de masa se mantienen constantes a lo largo de toda la columna obtenemos que la altura de esta se calcula como:

$$z = \frac{G_S}{K_Y \cdot a} \cdot \int_{Y_2}^{Y_1} \frac{dY}{(Y - Y^*)}$$

$$z = \frac{L_S}{K_X \cdot a} \cdot \int_{X_1}^{X_2} \frac{dX}{(X^* - X)}$$

, siendo: G_S el flujo molar de gas libre de soluto por unidad de área de la sección transversal de la torre, K_Y la constante de transferencia de masa por fracción molar de soluto por unidad de gas libre de soluto, *a* el área de transferencia de contacto entre la fase líquida – gas por unidad de volumen, Y la fracción de soluto en el gas libre de soluto e Y* la fracción en equilibrio con la fracción en el líquido X en la posición de coordenadas (X, Y).

Si no consideramos los coeficientes de transferencia de masa constantes a lo largo de la torre entonces tendremos que:

$$dz = \frac{-G_S \cdot dy}{K_G \cdot a \cdot P \cdot (y - y_i) \cdot (1 - y)^2}$$

$$dz = \frac{L_S \cdot dx}{K_L \cdot a \cdot C \cdot (x_i - x) \cdot (1 - x)^2}$$

En algunos casos se usa la simplificación del **gradiente de concentración medio logarítmico** (rangos de bajas concentraciones):

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

, donde:

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

, donde los valores de y_A* corresponden a aquellos en equilibrio con el valor de x_A asociado a y_A mediante la expresión de equilibrio (Ley de Henry u otra).

PROBLEMA N° 1

Para el secado de aire húmedo se emplea una torre de absorción de relleno utilizando como líquido absorbente una disolución de sosa cáustica de concentración molar 50%. 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. Calcule el número de etapas de contacto discontinuo necesarias, si la eficiencia de cada etapa es de un 40% y se utiliza un flujo líquido 50% superior al mínimo.

Tabla N° 1. Datos de equilibrio del sistema en estudio

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		

PM_{Agua}: 18 $^{g}/_{mol}$; PM_{Aire}: 29 $^{g}/_{mol}$.

SOLUCIÓN:

- ***Cálculo de las humedades molares***

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

  Y_1 = 0,012 kg agua/kg aire seco = 0,012·29 /18 = 0,01933 mol de agua/mol aire seco
  Y_2 = 0,003 kg agua/kg aire seco = 0,003·29 /18 = 0,00483 mol de agua/mol aire seco

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

X_2 = 1 mol de agua/mol de NaOH

- ***Cálculo de la razón mínima L_s/G_s***

Utilizando los datos de la curva de equilibrio otorgados en la tabla N° 1 y la información de las concentraciones en base inerte calculadas, determinamos gráficamente la razón mínima líquido/gas en la columna como lo indica la figura N° 1.

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).

Así se obtiene que la pendiente de la recta indicada es: $(L_s/G_s)_{min}$ = 0,00159

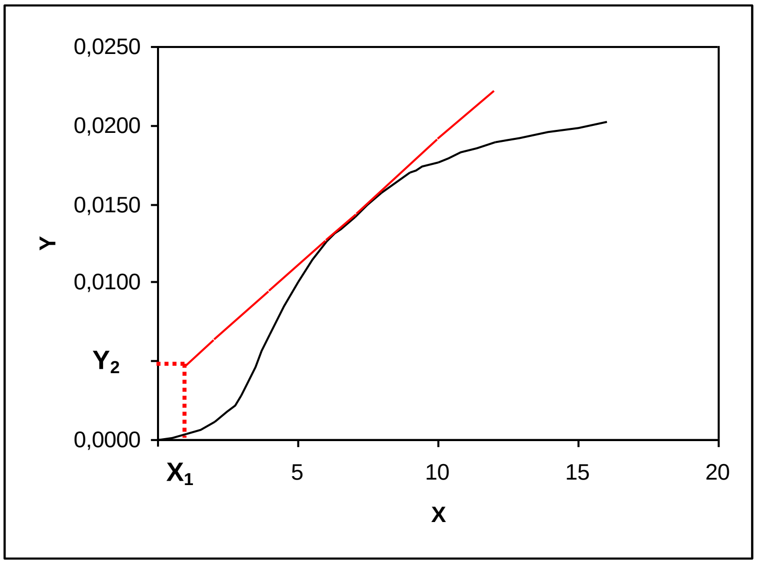
Como la operación se realiza con un flujo líquido 50% superior al mínimo, entonces la razón de operación será: (L_s/G_s) = 0,002385

Realizando un balance de masa para la operación se puede calcular la concentración de salida en el flujo líquido:

$L_S \cdot (X_1 - X_2) = G_S \cdot (Y_1 - Y_2) \;\; \rightarrow \;\; X_1 = 7{,}079$

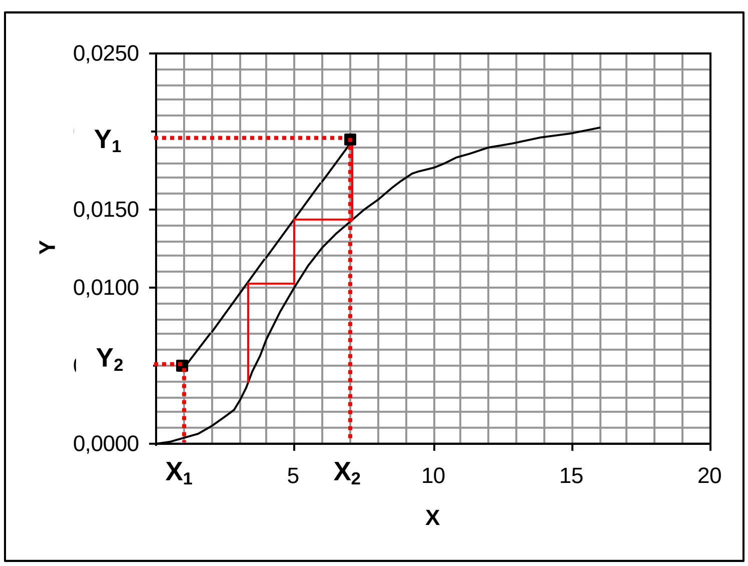
Finalmente se determina gráficamente el número de etapas teóricas necesarias (figura N° 2).

<u>Figura N° 1</u>. Cálculo de Razón Mínima L_s/G_s



- ***Cálculo del número de etapas***

<u>Figura N° 2</u>. Cálculo del Número de Etapas



El número de etapas teóricas es 2,84, pero como la eficiencia de cada etapa es un 40% se debe reducir la altura de las líneas verticales del escalonado en un 60% para el cálculo de las etapas de manera que se obtiene que el número de etapas necesarias será igual a **8**.

PROBLEMA N° 2

Se debe absorber amoniaco, 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 amoniaco. El flujo de gas de entrada es 1 $^{\text{mol de aire}}/_{\text{min}}$ y el flujo de agua es 1,39 $^{\text{mol}}/_{\text{min}}$. En estas condiciones el coeficiente global de transferencia de masa, $K_G \cdot a \cdot P$, puede ser asumido como 100 $^{\text{mol}}/_{\text{h-ft}^3}$. La concentración de amoniaco debe ser reducida desde 0,0825 a 0,003 en fracción molar.

Suponga que en estas condiciones se cumple la ley de Henry según la ecuación: $y^* = 0{,}185 \cdot x$

Determine la altura necesaria de la torre para cumplir los requerimientos.

NOTA: Suponga que tanto la curva de operación como la curva de equilibrio son aproximadamente rectas.

$PM_{\text{Amoníaco}}$: 17 $^{\text{g}}/_{\text{mol}}$

SOLUCIÓN:

El área transversal de la torre se puede calcular como:

$$A = \frac{\pi \times D^2}{4} = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{6{,}07}{12} \right)^2 = 0.201\,\text{ft}^2$$

Para la fase gaseosa sabemos que:

$$Y = \frac{y}{1-y}$$

Entonces obtenemos que:

$$y_1 = 0{,}0825; \qquad y_2 = 0{,}003$$
$$Y_1 = 0{,}09; \qquad Y_2 = 0{,}003$$

$G = (1\ \text{mol/min})/(0{,}201\ \text{ft}^2) = 4{,}98\ ^{\text{mol}}/_{\text{min-ft}^2}$
$G_S = G \cdot (1 - y_1) = 4{,}57\ ^{\text{mol}}/_{\text{min-ft}^2}$

Para la fase líquida tenemos que:

$x_2 = 0{,}00$; $X_2 = 0{,}00$ (libre de amoníaco)
$L_S = (1{,}39\ \text{mol/min})/(0{,}201\ \text{ft}^2) = 6{,}92\ ^{\text{mol}}/_{\text{min-ft}^2}$

Realizando un balance de masa global para el equipo tenemos que:

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

Obtenemos la concentración en la fase líquida a la salida:

$$X_1 = 0{,}057$$
$$x_1 = X_1/(1+ X_1) = 0{,}054$$

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:

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

, 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. Esto se consigue con la Ley de Henry:

$y_2* = 0{,}185\cdot x_2 = 0{,}185\cdot 0{,}000 = 0{,}000$
$y_1* = 0{,}185\cdot x_1 = 0{,}185\cdot 0{,}054 = 0{,}0100$
$(y_1 - y_1*) = 0{,}0825 - 0{,}0100 = 0{,}0725$
$(y_2 - y_2*) = 0{,}0030 - 0{,}000 = 0{,}0030$

Entonces,

$(y - y*)_{\ln} = 2{,}18\cdot 10^{-2}$

Finalmente:

$$z = \frac{G}{K_G \cdot a \cdot P} \cdot \frac{y_{A1} - y_{A2}}{(y_A - y_A*)_{\ln}} = \frac{298{,}8}{100} \cdot \frac{0{,}0825 - 0{,}0030}{0{,}0218}$$

$$z = 10{,}9 \text{ ft}$$

Para determinar el valor de *G* en unidades de mol/h-ft^2 se debe multiplicar el valor obtenido de *G* (4,98 mol/min-ft^2) por 60 min/h obteniéndose: 298,8 mol/h-ft^2.

Para el mismo sistema del problema anterior calculemos la altura de la torre por integración directa. Utilicemos $K_Y \cdot a$ = 4,6 mol/h-ft^3-ΔY_{NH3} y consideremos la siguiente información de equilibrio:

<u>Tabla N° 1.</u> Datos de Equilibrio del Proceso

X mol NH_3/mol H_2O	0,0164	0,0252	0,0455	0,0722
Y mol NH_3/mol aire	0,0210	0,0320	0,0530	0,0800

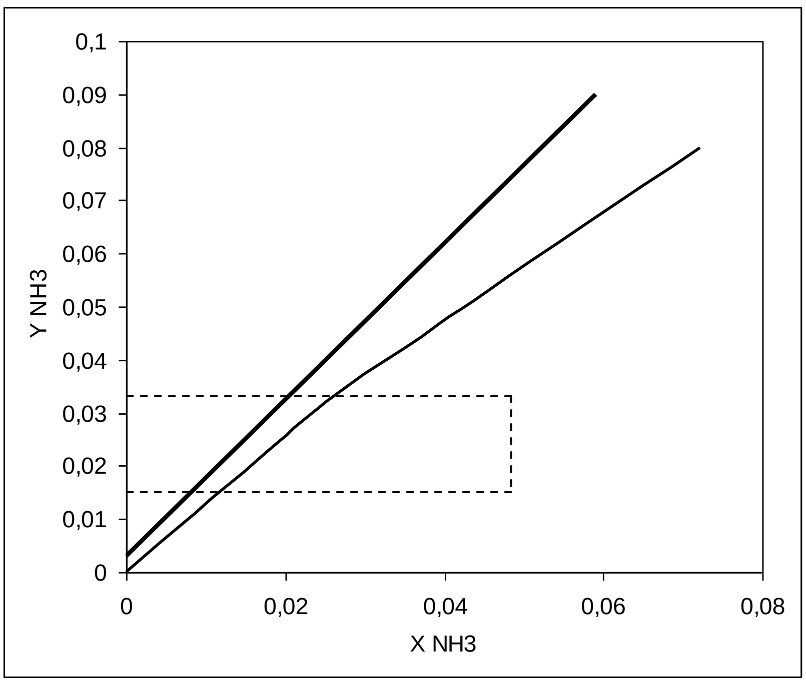
SOLUCIÓN:

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

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

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

<u>Figura N° 1.</u> Condiciones de Operación y de Equilibrio



De esta figura se obtienen los valores de Y* para cada valor de Y y se construye la tabla N° 2.

Luego es posible evaluar el número de unidades de transferencia (de manera numérica) utilizando la integral respectiva:

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

(El cálculo de esta integral se realiza utilizando el método de Riemann de la sumatoria de las áreas de polígonos regulares de acuerdo a los datos de la tabla N° 3 que pueden ser graficados con el fin de realizar este tipo de cálculo. Los polígonos utilizados son de altura $1/(Y_A - Y_A^*)$ y ancho ΔY_A).

Finalmente se obtiene:

z = 4,57/4,60 x 10,95 = 10,9 ft

Tabla N° 2. Cálculo de Datos de Equilibrio de manera gráfica

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