Absorción de gases concentrados

IIQ2023 - Operaciones Unitarias II

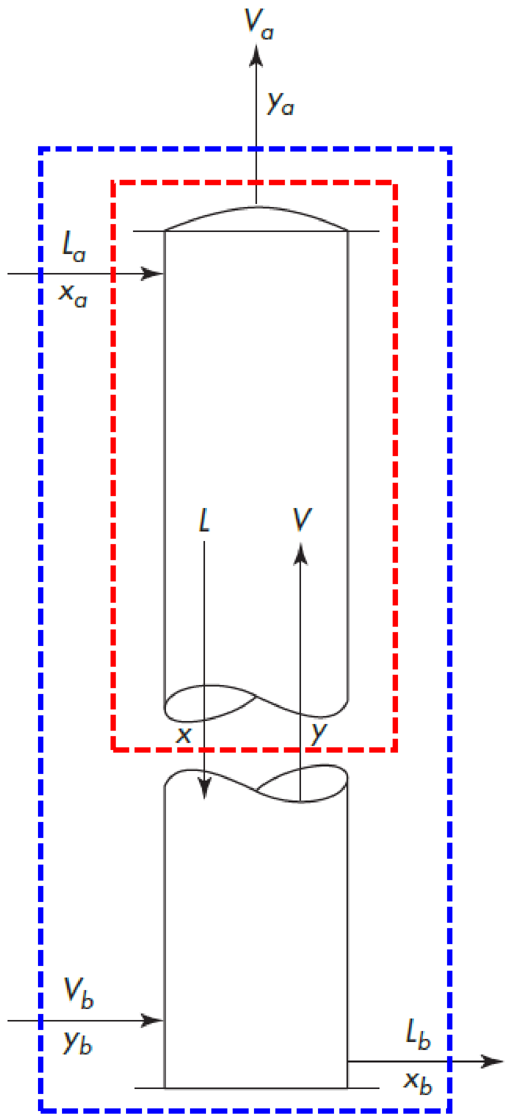
José Rebolledo Oyarce

18 de Mayo de 2021

Contenidos

- Recordatorio de Clase Anterior
- Objetivos de la Clase
- Absorción de gases concentrados
    - Limitaciones de absorción en gases concentrados
    - Línea de operación general de la torre
    - Altura de la torre de absorción

¿Qué ocurre a lo largo de la torre?



El balance de materia de la envolvente es:

Balance Global de Materia

$$L_a + V = L + V_a$$

Balance de Materia del compuesto A

$$L_a x_{A,a} + V y_A = L x_A + V_a y_{A,a}$$

Donde tenemos que el balance completo el sistema está comprendido en la ecuación anterior ya que el balance global es:

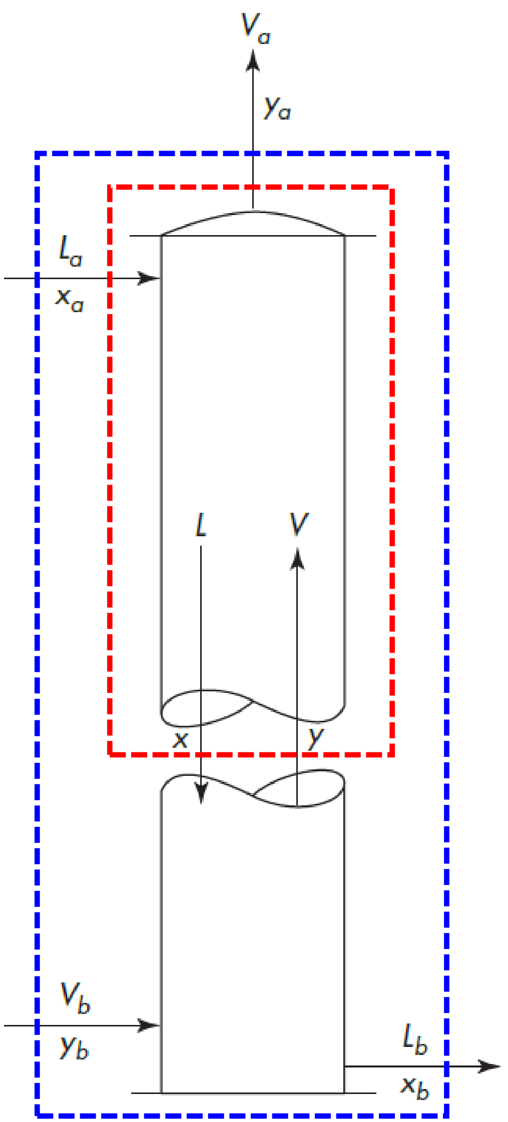
Balance Global de Materia

$$L_a + V_b = L_b + V_a$$

Balance de Materia del compuesto A

$$L_a x_{A,a} + V_b y_{A,b} = L_b x_{A,b} + V_a y_{A,a}$$

¿Qué ocurre a lo largo de la torre?



Entonces a partir de la ecuación de balances de la envolvente roja:

Balance de Materia del compuesto A

$$L_a x_{A,a} + V y_A = L x_A + V_a y_{A,a}$$

Tenemos lo siguiente:

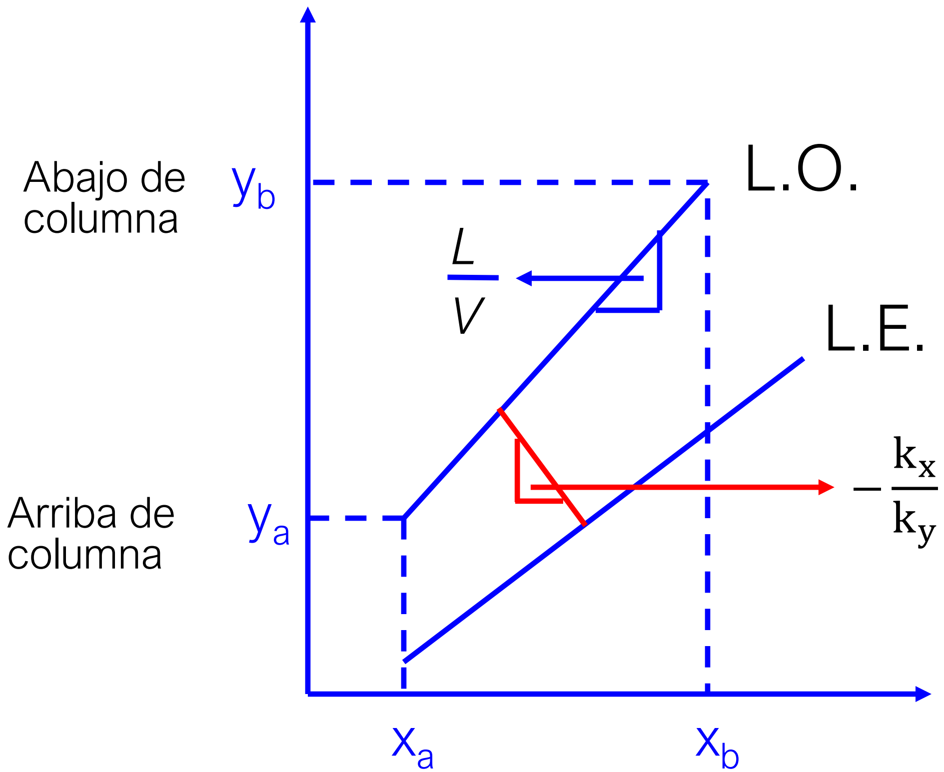
Línea de Operación

$$y = \frac{L}{V} x + \frac{V_a y_a - L_a x_a}{V}$$

Línea de Operación para gases diluidos (V y L constantes)

$$y = \frac{L}{V} x + \frac{V y_a - L x_a}{V}$$

Gráficamente…



En cada punto de la columna se tiene:

$$N = k_x(x_i - x)$$
$$N = k_y(y - y_i)$$

$$\Rightarrow \quad \frac{y - y_i}{x - x_i} = -\frac{k_x}{k_y}$$

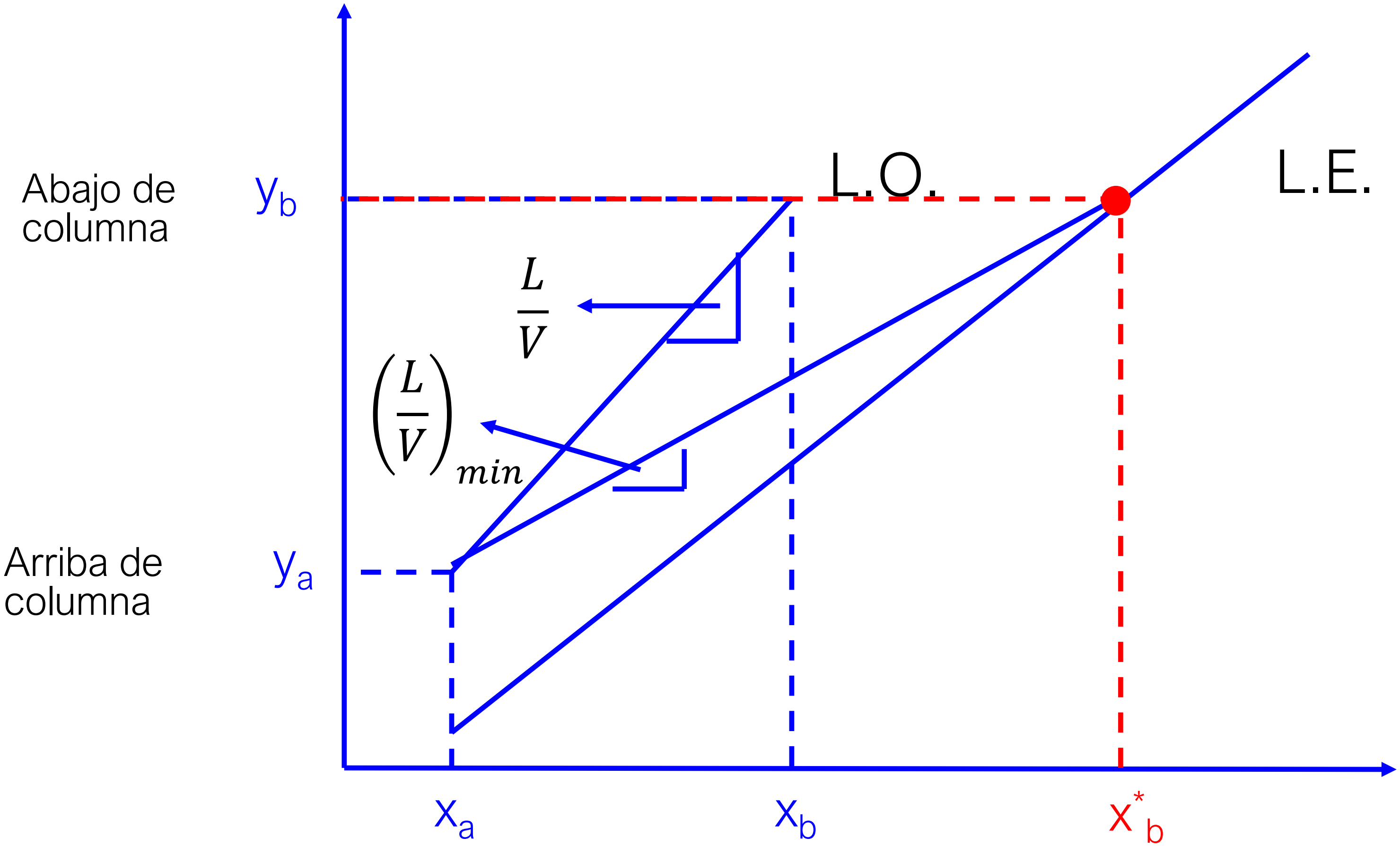
Absorción: L.O. siempre está por arriba

Desorción: L.O. siempre está por debajo

L.O. Indica la relación entre la concentración en el gas y en el líquido en cualquier nivel de la torre.

L.E. se obtiene de la Ley de Henry.

Relación de Gas-Líquido Mínima



Bajo esta relación de Gas-Líquido mínimo se necesitaría una altura infinita de la torre para obtener el resultado requerido, ya que en el fondo de la columna no hay diferencia de concentración (no hay fuerza motriz)

Contenidos

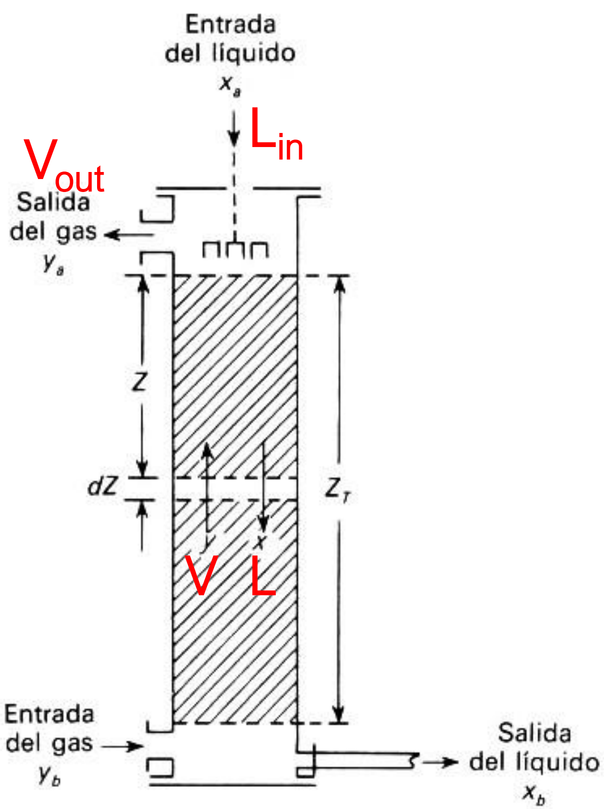
- Entender el concepto de Línea de Operación en una torre de absorción de gases concentrados

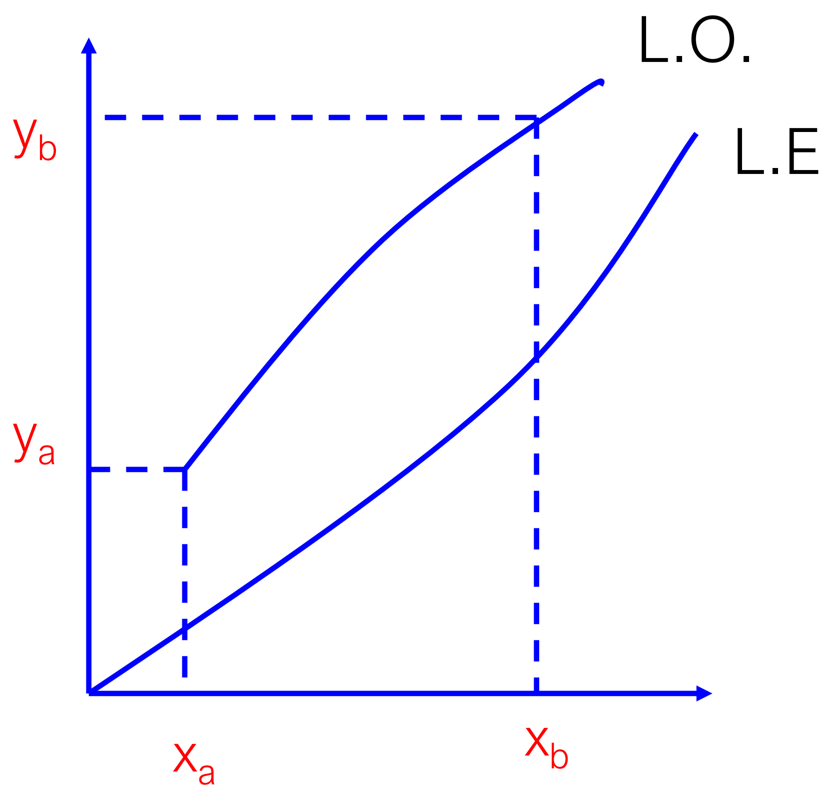
- Estimar la altura de una columna en la absorción de vapores concentrados.

Absorción de vapores concentrados

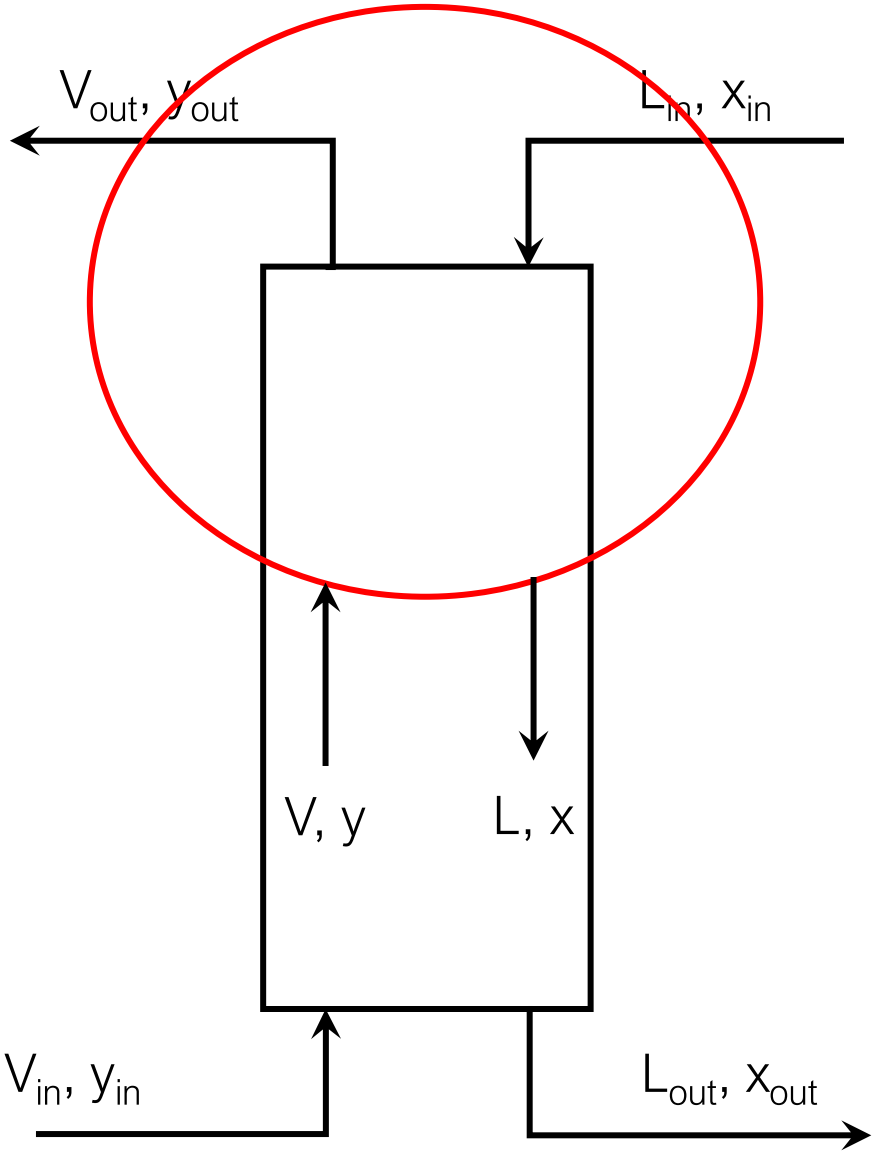
Problema: En este caso L y V no permanecen ctes. a lo largo de la columna porque la transferencia de soluto no se puede despreciar.

Adicionalmente, la Ley de Henry tampoco se puede aplicar.





Absorción de vapores concentrados – Balance de Materia



El Balance Global de Materia es:

$$V + L_{in} = V_{out} + L$$

Y el balance de materia por componente:

$$Vy + L_{in}x_{in} = V_{out}y_{out} + Lx$$

Pero, si consideramos que sólo se transfiere el soluto de interés. Entonces, si hacemos el balance para el líquido inerte y gas inerte:

$$L_{in}(1 - x_{in}) = L(1 - x)$$

$$V(1 - y) = V_{out}(1 - y_{out})$$

Entonces, si hacemos el balance para el líquido inerte y gas inerte:

$$L_{in}(1 - x_{in}) = L(1 - x)$$

$$V(1 - y) = V_{out}(1 - y_{out})$$

Si hacemos un reordenamiento de las ecuaciones anteriores:

$$L = L_{in}\frac{1 - x_{in}}{1 - x}$$

$$V = V_{out}\frac{1 - y_{out}}{1 - y}$$

Entonces, volviendo a la ecuación de balance de materia para el compuesto de interés:

$$Vy + L_{in}x_{in} = V_{out}y_{out} + Lx$$

$$\left(V_{out}\frac{1 - y_{out}}{1 - y}\right)y + L_{in}x_{in} = V_{out}y_{out} + \left(L_{in}\frac{1 - x_{in}}{1 - x}\right)x$$

$$\left(V_{out}\frac{1-y_{out}}{1-y}\right)y + L_{in}x_{in} = V_{out}y_{out} + \left(L_{in}\frac{1-x_{in}}{1-x}\right)x$$

Pero si definimos:

$$X = \frac{x}{1-x}$$

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

Entonces, si reemplazamos en la ecuación de balance:

$$V_{out}(1-y_{out})Y + L_{in}x_{in} = V_{out}y_{out} + L_{in}(1-x_{in})X$$

Ahora, si despejamos Y en función de los demás términos:

$$V_{out}(1-y_{out})Y = V_{out}y_{out} + L_{in}(1-x_{in})X - L_{in}x_{in}$$

$$Y = Y_{out} + \frac{L_{in}(1-x_{in})X - L_{in}x_{in}}{V_{out}(1-y_{out})}$$

$$Y = Y_{out} + \frac{L_{in}(1 - x_{in})X - L_{in}x_{in}}{V_{out}(1 - y_{out})}$$

Pero si hacemos un cambio de variable de la siguiente manera:

$$L' = L_j\left(1 - x_j\right)$$
$$V' = V_j\left(1 - y_j\right)$$

Donde L' y V' son los flujos de líquido inerte a la entrada y gas inerte a lo largo de la columna, respectivamente:

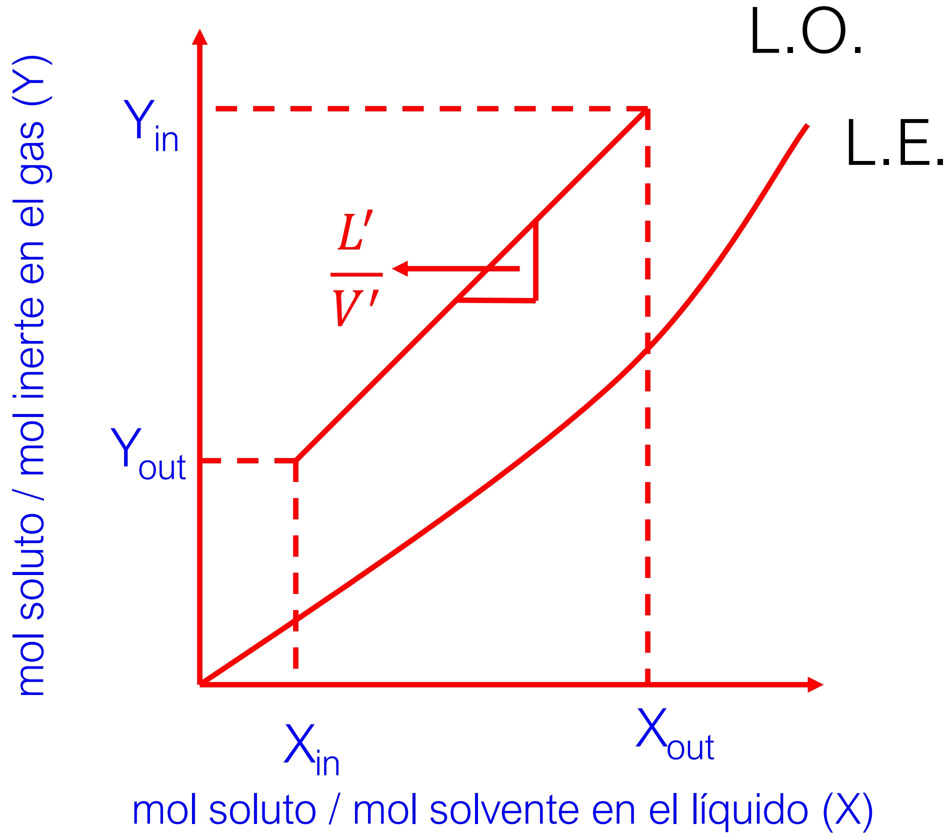
$$Y = Y_{out} + \frac{L'X - L_{in}x_{in}}{V'}$$

Pero $L_{in} = \frac{L'}{1-x_{in}}$, entonces:

$$\boxed{Y = Y_{out} + \frac{L'}{V'}X - \frac{L'}{V'}X_{in}}$$

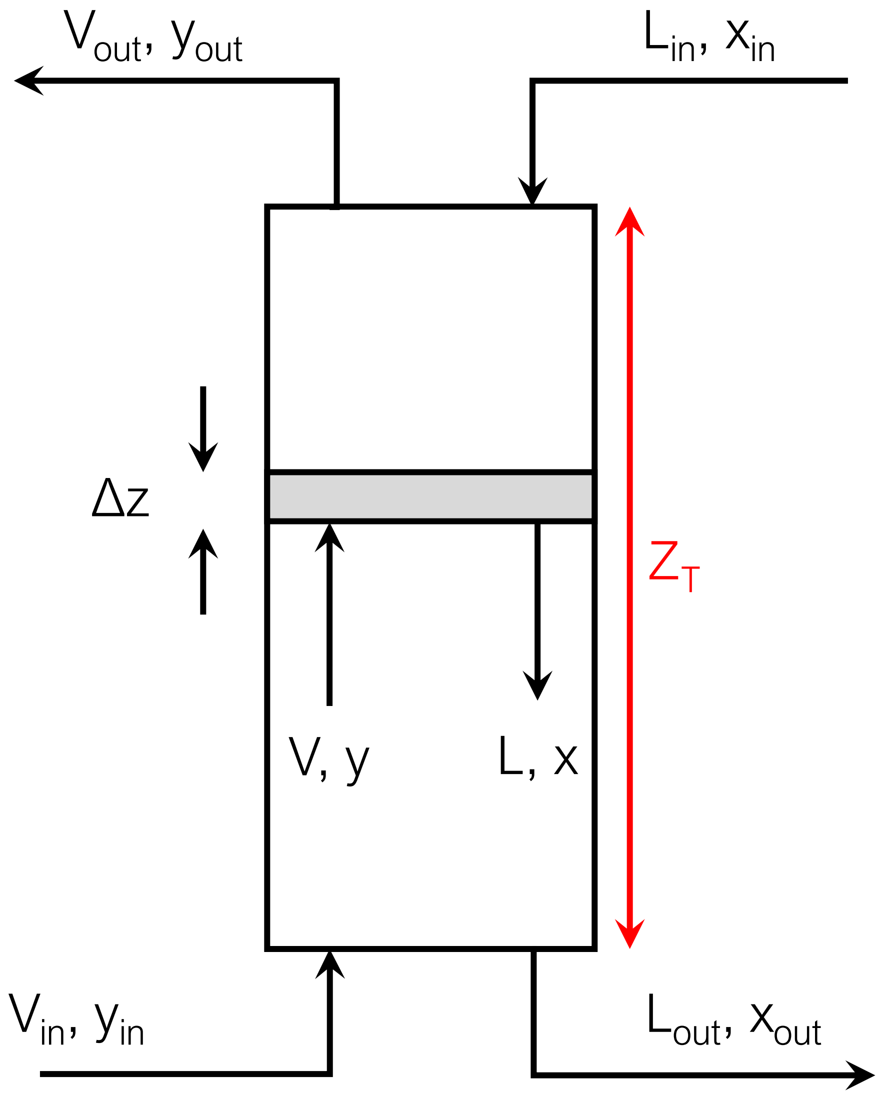
Ecuación de una recta en un gráfico X,Y que también relaciona la composición en el seno del gas con la del seno del líquido para cualquier altura de la torre.

Gráficamente …



L.E.: x e y ya no son directamente proporcionales. En general los datos de equilibrio se obtienen de gráficos o tablas (pares x,y) a partir de los cuales se obtienen pares (X,Y).

Absorción de vapores concentrados – Altura de la Torre



El balance de materiales en el volumen AΔz

Variación de moles de soluto en el vapor = moles transferidos al líquido

$$Vy\Big|_z - Vy\Big|_{z+\Delta z} = K_G a A \Delta z (p - p^*)$$

$$= K_G a A \Delta z P (y - y^*)$$

Dividiendo por AΔz y tomando límite cuando Δz tiende a cero se obtiene:

$$\frac{1}{A}\frac{d(Vy)}{dz} = -K_G a P(y - y^*)$$

Para poder integrar, reordenamos la ecuación diferencial obtenida:

$$\frac{d(Vy)}{dz} = -K_G aAP(y - y^*)$$

¿Qué hacemos ahora?

Apoyándonos en la idea que sólo se transfiere el compuesto de interés, podemos expresar la ecuación en función del flujo de gas inerte:

$$V' = V\ (1 - y)$$

$$\frac{d\left(V' \frac{y}{1-y}\right)}{dz} = -K_G aAP(y - y^*)$$

$$\Leftrightarrow \quad \frac{V' d\left(\frac{y}{1-y}\right)}{dy} \frac{dy}{dz} = -K_G aAP(y - y^*)$$

$$\Leftrightarrow \quad \frac{V'}{(1-y)^2} \frac{dy}{dz} = -K_G aAP(y - y^*)$$

Integrando la última ecuación:

$$\frac{V'}{(1-y)^2}\frac{dy}{dz} = -K_G aAP(y - y^*) \qquad / \int$$

$$\boxed{Z_T = \int_0^{Z_T} dz = \frac{V'}{K_G aAP}\int_{y_{out}}^{y_{in}} \frac{dy}{(1-y)^2(y-y^*)}}$$

La altura de la torre se puede encontrar integrando, usando los valores de y e y^* de un diagrama (L.E. y L.O.).

$$Z_T = \int_0^{Z_T} dz = \frac{V'}{K_G aAP} \int_{y_{out}}^{y_{in}} \frac{dy}{(1-y)^2 (y-y^*)}$$

Otra forma de esta expresión, es considerar lo siguiente:

$$d(Vy) = V' d\left(\frac{y}{1-y}\right) = V' \frac{dy}{(1-y)^2} = V(1-y)\frac{dy}{(1-y)^2} = V\frac{dy}{(1-y)}$$

Con ello, la ecuación diferencial queda de la siguiente manera:

$$\frac{V}{(1-y)}\frac{dy}{dz} = -K_G aAP(y-y^*)$$

$$Z_T = \int_0^{Z_T} dz = \int_{y_{out}}^{y_{in}} \frac{V}{K_G aAP} \frac{dy}{(1-y)(y-y^*)}$$

$$Z_T = \int_0^{Z_T} dz = \int_{y_{out}}^{y_{in}} \frac{V}{K_G a A P} \frac{dy}{(1-y)(y-y^*)}$$

Si esta expresión la multiplicamos y dividimos por la media logarítmica de $(1-y)$ y $(1-y^*)$, es decir, $(1-y)_{LM}$, en donde:

$$(1-y)_{LM} = \frac{(1-y)-(1-y^*)}{\ln\left[\frac{(1-y)}{(1-y^*)}\right]} = \frac{y^*-y}{\ln\left[\frac{(1-y)}{(1-y^*)}\right]}$$

Entonces,

$$Z_T = \int_0^{Z_T} dz = \int_{y_{out}}^{y_{in}} \frac{V}{K_G a A P (1-y)_{LM}} \frac{(1-y)_{LM} dy}{(1-y)(y-y^*)}$$

Si bien sabemos que V y $(1-y)_{LM}$ no son constante a lo largo de la torre, podemos considerar que la razón entre estos términos puede ser constante.

Si bien sabemos que V y $(1-y)_{LM}$ no son constante a lo largo de la torre, podemos considerar que la razón entre estos términos puede ser constante.

Con ello, la expresión $\frac{V}{K_G aAP(1-y)_{LM}}$ se puede extraer de la integral:

$$Z_T = \int_0^{Z_T} dz = \underbrace{\frac{V}{K_G aAP(1-y)_{LM}}}_{H_{OG}} \underbrace{\int_{y_{out}}^{y_{in}} \frac{(1-y)_{LM} dy}{(1-y)(y-y^*)}}_{N_{OG}}$$

Absorción de vapores concentrados – Supuestos Importantes

Para que las ecuaciones anteriores sean aplicables se debe cumplir con las siguientes condiciones:

- Se absorbe sólo un vapor desde un gas inerte hacia un líquido no-volátil
- Se considera que se puede utilizar un único coeficiente de transferencia de materia para caracterizar el sistema a distintas concentraciones.

Ejemplo: Absorción de Gases Concentrados

Una corriente de aire de 100 kmol/h que contiene 20% (molar) de Cl_2 ingresa a una columna de absorción de lechos empacados. En esta columna se absorber el 99% de Cl_2 utilizando agua a 20°C y operando el sistema a presión atmosférica.

Hint: Datos de equilibrio

$$y = \frac{p_{Cl_2}}{760\ torr}$$

$$x = \frac{gramos\ Cl_2/L/71}{1000/18 + (gramos\ Cl_2/L/71)}$$

pCl_2, torr	g Cl2/L a 20°C
100	1.773
150	2.27
200	2.74

Los datos de equilibrio del sistema son:

x	0.0001	0.00015	0.0002	0.00025	0.0003
y	0.006	0.012	0.024	0.04	0.06

Determine el flujo mínimo de agua necesario para el sistema planteado

Ejemplo: Absorción de Gases Concentrados

Datos:

- Se va a tratar 100 kmol/h que contiene 20% de Cl_2
- La torre se opera a 20°C y 1 atm
- La salida de gas contiene 1% de Cl_2

Con los datos anteriores, sabemos que el flujo de gas inerte es:

$$V' = V_{in}(1 - y_{in}) = 100(1 - 0.2) = 80\,\frac{kmol}{h}$$

Adicionalmente sabemos que:

$$Y_{in} = \frac{y_{in}}{1 - y_{in}} = \frac{0.2}{0.8} = 0.25$$

$$Y_{out} = \frac{0.01}{0.99} = 0.0101$$

Ejemplo: Absorción de Gases Concentrados

Y podemos suponer que al inicio el agua no tiene Cl_2, por lo tanto

$$X_{in} = 0$$

Ahora si revisamos los datos que nos entregaron:

x	y	X = x/(1-x)	Y= y/(1-y)
0.00010	0.006	0.00010	0.00604
0.00015	0.012	0.00015	0.01215
0.00020	0.024	0.00020	0.02459
0.00025	0.040	0.00025	0.04167
0.00030	0.060	0.00030	0.06383

Pero teníamos que Y_{in} es igual a 0.25, por lo que necesitamos valores de equilibrio adicionales para completar la línea de equilibrio del sistema. Para ellos podemos usar el Hint que nos entrega una formula para obtener esos valores de equilibrio.

Ejemplo: Absorción de Gases Concentrados

Utilizando el Hint, entonces podemos obtener el siguiente cuadro

$$y = \frac{p_{Cl_2}}{760\ torr}$$

$$x = \frac{gramos\ Cl_2/L/71}{1000/18 + (gramos\ Cl_2/L/71)}$$

pCl_2, torr	g Cl2/L	y	x
100	1.773	0.132	0.000449
150	2.27	0.197	0.000575
200	2.74	0.263	0.000694

Con estos datos podemos complementar la tabla original y alcanzamos a cubrir todo el espectro de la operación de la torre

Ejemplo: Absorción de Gases Concentrados

Con estos datos podemos complementar la tabla original y alcanzamos a cubrir todo el espectro de la operación de la torre

x	y	X = x/(1-x)	Y= y/(1-y)
0.00010	0.006	0.00010	0.00604
0.00015	0.012	0.00015	0.01215
0.00020	0.024	0.00020	0.02459
0.00025	0.040	0.00025	0.04167
0.00030	0.060	0.00030	0.06383
0.000449	0.132	0.000449	0.15152
0.000575	0.197	0.000575	0.24590
0.000694	0.263	0.000695	0.35714

Ahora podemos responder la pregunta planteada

Ejemplo: Absorción de Gases Concentrados

Para determinar la razón mínima de agua, lo mejor es hacerlo de manera gráfica.
Recordemos que hay reflujo mínimo cuando la curva de operación en el fondo de la torre intercepta con la curva de equilibrio, obteniendo infinitas etapas de equilibrio.
Con estas consideraciones hacemos uso de la línea de operación de gases concentrados:

$$Y = Y_{out} + \frac{L'}{V'}X - \frac{L'}{V'}X_{in}$$

Pero $X_{in} = 0$ e $Y_{out} = 0.0101$, por lo tanto:

$$X = 0 \quad \rightarrow Y = Y_{out} = 0.0101$$

Y haciendo una interpolación en los datos de equilibrio, podemos obtener el punto X de intercepción

Ejemplo: Absorción de Gases Concentrados

Considerando que el punto de intercepción es $Y = Y_{in} = 0.25$, entonces la interpolación es:

$$X_2 = (Y_2 - Y_1)\frac{(X_3 - X_1)}{(Y_3 - Y_1)} + X_1$$

$$X_2 = (0.25 - 0.2459)\frac{0.0006950 - 0.000575}{0.35714 - 0.2459} + 0.000575$$

$$X_2 = 0.000579$$

Con ello la línea de operación nos quedaría:

$$X = 0.000579 \rightarrow Y = 0.25$$

$$Y = Y_{out} + \frac{L'}{V'}X \;\rightarrow \frac{L'}{V'} = \frac{0.25 - 0.0101}{0.000579} = 414.03$$

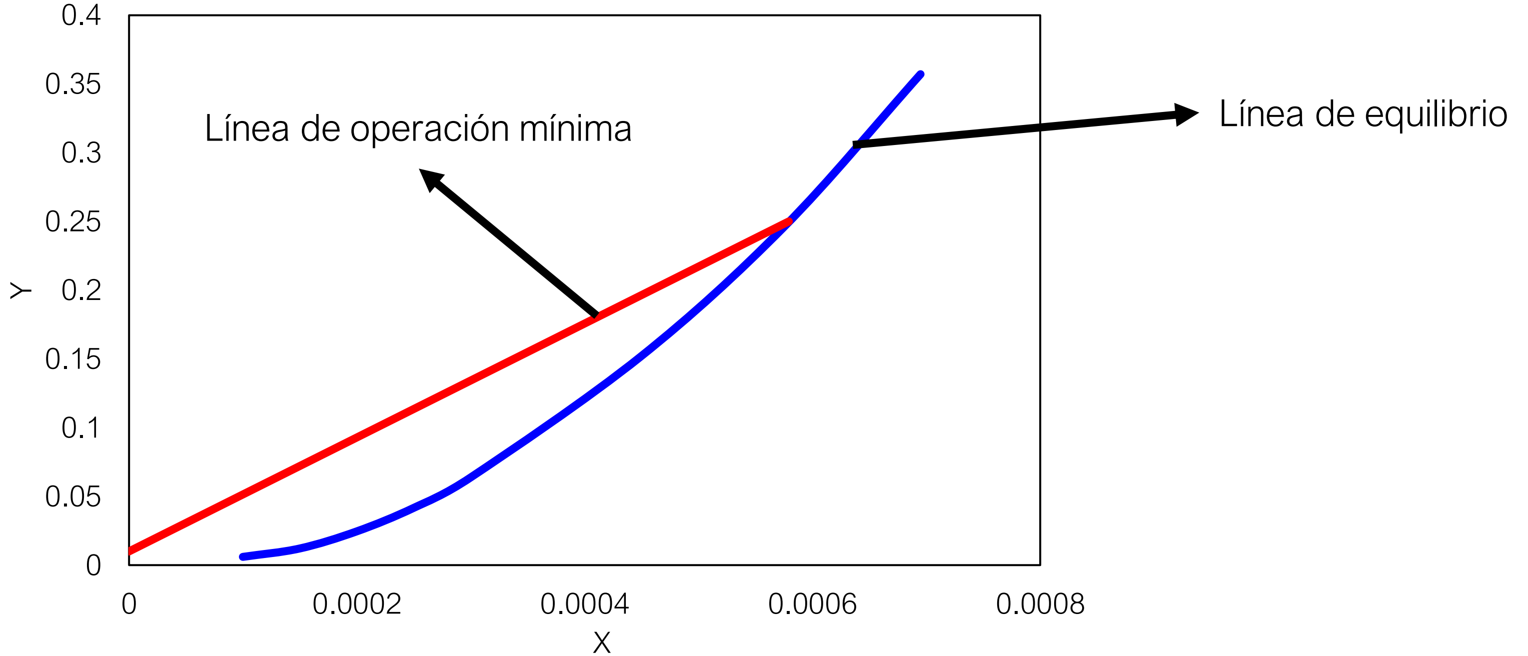
Ejemplo: Absorción de Gases Concentrados

$$Y = Y_{out} + \frac{L'}{V'}X \rightarrow \frac{L'}{V'} = \frac{0.25 - 0.0101}{0.000579} = 414.03$$

Pero sabemos que V' es igual a 80 kmol/h, por lo tanto:

$$L'_{min} = V'(414.03) = 80(414.03) = 33133.61\,\frac{kmol}{h}$$

Gráficamente, la línea de operación a razón de líquido mínimo es



Conceptos Revisados en la Clase

- Entender el concepto de Línea de Operación en una torre de absorción de gases concentrados

- Estimar la altura de una columna en la absorción de vapores concentrados.

Absorción de gases concentrados

IIQ2023 - Operaciones Unitarias II

José Rebolledo Oyarce

18 de Mayo de 2021