

Taller 1

Cristian Pineda, Nicolas Ariza, Rafael Montagut, Deyver Rivera

Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, Calle 44 # 45-67. Bogotá D.C., Colombia.
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental,
Operaciones de separación.

ENUNCIADO

Una corriente de gas, 0,3 m³/s a 860 mm Hg y 25°C, compuesta de metano y 10% v de vapores de pentano se debe despojar para retirar el 90% de pentano en una columna por etapas. Para ello se cuenta con un flujo de solvente parafínico de baja volatilidad a las condiciones de la operación, 25°C, este solvente proveniente de la sección de regeneración contiene 0,5% mol de pentano. Para este caso se podrá ignorar la solubilidad del metano en el solvente.

Si la operación se aproxima a la condición isotérmica, calcule

1. El número de etapas de equilibrio requeridas para la recuperación propuesta, si se usa 1,2; 1,4; 1,6 y 1,8 veces el flujo mínimo de aceite de absorción. En cada caso obtenga el perfil de concentraciones en la columna
2. Si en una época, por razones de cambio en un proceso previo, se deberá realizar la operación a 28°C, determine el flujo mínimo de aceite requerido, y el número de etapas de equilibrio para las relaciones indicadas arriba. En cada caso obtenga el perfil de concentraciones en la columna.
3. Se desea establecer la posibilidad de tratar el mismo flujo molar de gas, una columna disponible que dispone de 10 etapas de contacto con eficiencia global de 60%, determine los flujos y concentraciones de las corrientes con las cuales será posible cumplir con el objetivo de separación.

Con base en las tablas de resultados haga los gráficos de tendencia, analice el efecto de las variables y genere las conclusiones.

Nota: el equilibrio L/G, en fracción molar para el pentano se ajusta a la expresión, $y=mx$, donde $m=4E-5 \exp(0,0329 \cdot T(K))$.

Diagrama del proceso

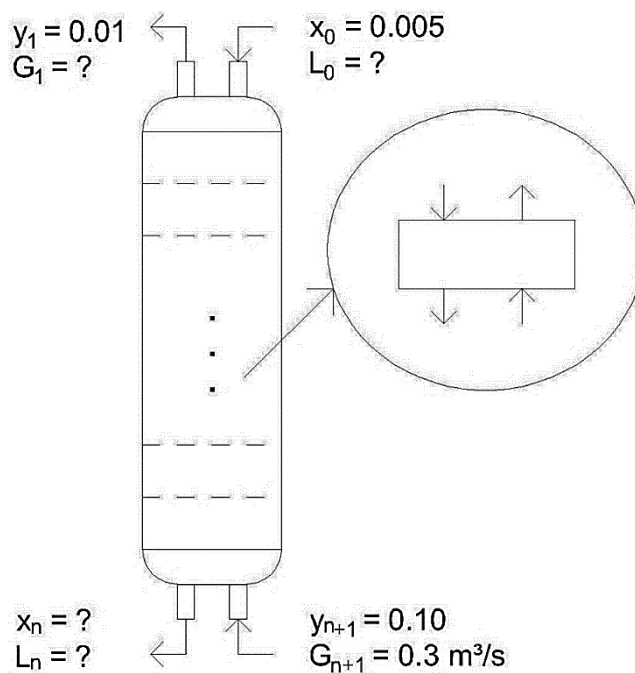


Figura 1. Diagrama del proceso

Metodología

Para la solución del taller se han desarrollado dos algoritmos de Matlab que funcionan bajo la metodología que se consigna a continuación.

Punto 1 y punto 2

Organizamos la información suministrada por el ejercicio, en donde tenemos las condiciones de operación, algunos datos de las corrientes y la expresión de la curva de equilibrio en fracciones molares. En los datos tenemos el caudal y composición de la corriente de entrada de gas, tenemos composición de entrada de la corriente de líquido y el porcentaje de absorción del soluto.

Con las condiciones de operación convertimos el caudal de entrada del gas en flujo molar, para posteriormente con sus concentraciones y el porcentaje de absorción, determinar el flujo y concentraciones de la corriente de salida del gas.

Convertimos las concentraciones que tenemos en términos de relaciones molares y como tenemos la expresión de la curva de equilibrio en términos de fracciones molares, también la convertimos en términos de relaciones molares, para con ella y la concentración de entrada del gas, determinar la concentración máxima de la corriente líquida, para posteriormente calcular la pendiente mínima de la curva operadora y con el flujo de gas inerte (determinado con flujo de gas y su concentración) se obtendría el flujo mínimo de líquido.

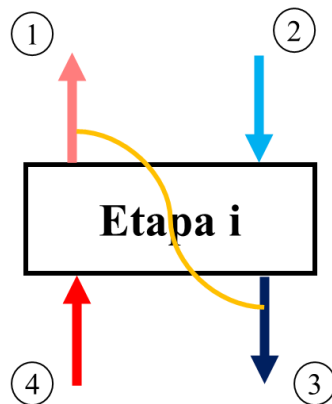
Ahora se toma uno de los incrementos del flujo mínimo (por ejemplo 1,2), con lo cual tendremos ahora el flujo de operación del líquido y a su vez, la pendiente de la curva operadora. Como tenemos las relaciones molares de entrada y salida del gas, la de entrada de líquido y los dos flujos inertes (L_s y G_s), mediante un balance de masa del soluto determinamos la concentración de salida del líquido.

Para determinar el número de etapas realizaremos un análisis por etapa consecutiva (uno a uno), comenzando por la parte superior teniendo en cuenta lo siguiente pautas:

-La corriente de salida del líquido de la etapa está en equilibrio con la corriente de salida del gas de esta.

-Mediante un balance de masa del soluto en la etapa se determinaría la concentración de la corriente de entrada del gas a la etapa

De una forma más descriptiva:



Inicialmente tenemos 1 y 2, posteriormente se calcula 3 teniendo en cuenta que está en equilibrio con 1 (usando la curva de equilibrio) y por último se calcula 4 mediante un balance de masa del soluto.

Se repite el procedimiento con la siguiente etapa (donde 4 y 3 serán ahora 1 y 2) y así sucesivamente, hasta que las concentraciones de entrada de gas y salida de líquido de la “etapa” sean iguales o superiores a las de entrada de gas y salida de líquido de la “columna”. De esta forma obtenemos el número de etapas de la columna.

Todo el proceso se repite para los distintos valores de incremento del flujo mínimo y posteriormente se repite todo cambiando la temperatura de operación de 25°C a 28°C.

Punto 3

La variable que se ha escogido para variar hasta encontrar la condición requisito (10 etapas) es el flujo de entrada de líquido, ya que el flujo de gas y su concentración están dadas y que cambiar la concentración en el líquido es algo que en muchas condiciones no es factible.

Para este punto realizará un proceso de ensayo y error en donde se cambiará el valor de la relación del flujo del líquido con respecto al flujo mínimo hasta obtener una columna que requiera 10 etapas.

Como las condiciones siguen siendo las mismas, ya se tendría la curva de equilibrio, los valores de las corrientes de salida y entrada de gas, como también la concentración de entrada del líquido y el flujo mínimo; posteriormente se supone un valor para la relación del flujo de líquido con respecto al mínimo. Inicialmente, este valor es de 1,11 y con este se puede definir totalmente la curva operatoria hallando la concentración de salida del líquido.

Ahora, se debe tomar en cuenta la eficiencia antes de hacer el cálculo de las etapas. La eficiencia se trabaja como el porcentaje de acercamiento en la etapa desde un punto en la curva operatoria hasta la curva de equilibrio. Además, dado a que en este caso la operatoria es una recta y la curva de equilibrio se aproxima a serlo (en relaciones molares), esta curva de eficiencia también se define y trabaja como una recta.

En un caso de etapa ideal el número de etapas puede calcularse al trazar una línea horizontal desde la operatoria hasta el equilibrio, y luego una vertical del equilibrio a la operatoria hasta cubrir el rango de operación. En este caso, las rectas lanzadas no llegan a la curva de equilibrio, estas deben llegar hasta la llamada anteriormente como curva de eficiencia, la cual se debe ubicar justamente en el 60% de avance sobre la impulsora para todos los puntos de la operatoria.

Para realizar la curva respecto a la eficiencia se calculan las curvas de la fuerza impulsora con el inverso de la pendiente de la curva operatoria, pues estas curvas son perpendiculares entre sí. Esto se halla para los puntos superior e inferior de la columna y con esto se halla la distancia entre estos puntos en la curva de operación y sus equivalentes en la curva de equilibrio. Estas magnitudes se multiplican por la eficiencia para obtener los puntos a los que la operación podría llegar teniendo en cuenta la eficiencia. Con estos nuevos dos puntos se halla entonces la expresión de la curva referente a la eficiencia.

Se determina el número de etapas de la misma forma que en los puntos 1 y 2, pero ahora tomando la curva de eficiencia para la relación entre las corrientes de salida de cada etapa, ya que no se llega al equilibrio. Con ello se obtiene el número de etapas para el incremento puntual sobre el flujo mínimo que se ha trabajado.

Si el número de etapas calculado es mayor a 10, se aumenta el incremento del flujo mínimo en 0,01. Este cálculo se realizará consecutivamente hasta obtener un valor de 10 etapas necesarias.

Muestra de cálculo (Puntos 1 y 2)

Nota: Por términos prácticos el subíndice 1 hace referencia a la parte inferior de la columna y el subíndice 2 hace referencia a la parte superior.

Dado a que los métodos de solución para ambos puntos son idénticos, se presenta el método para el punto 1 (25 °C)

Información suministrada

$$Q_{G1} = 0.3 \frac{m^3}{s}, \quad P = 860 \text{ mmHg}, \quad T = 25^\circ C = 298K$$

$$y_1^{C5} = 0.100, \quad \%Absor = 90\%, \quad x_2^{C5} = 0.005$$

$$y_{C5}^* = 4 \cdot 10^{-5} \cdot \exp(0.0329 \cdot T(K)) \cdot x_{C5}^* = 0.728 \cdot x_{C5}^*$$

Cálculo de L min

Pentano → A

Inicialmente se calcula el flujo molar de entrada del gas G1:

$$G_1 = P \cdot Q_{G1} / (R \cdot T) \cdot 1000 = \frac{114.657 \text{ kPa} \cdot 0.3 \frac{m^3}{s}}{8.3145 \frac{kJ}{kmol \cdot K} \cdot 298.15 \text{ K}} = 13.8756 \text{ mol/s}$$

En la parte inferior se tiene para la fase gaseosa:

$$Y_{A1} = \frac{y_{A,1}}{1 - y_{A,1}} = \frac{0.100}{1 - 0.100} = 0.11111$$

Y, la composición de salida se puede determinar cómo:

$$\% \text{ Absorción} = \frac{G_s Y_1 - G_s Y_2}{G_s Y_1} = \frac{Y_1 - Y_2}{Y_1}$$

$$\rightarrow Y_2 = (1 - \%Absor.) Y_1 = 0.10 \cdot 0.11111 = 0.01111$$

Y, para la fase líquida:

$$X_{A1} = \frac{x_{A,1}}{1 - x_{A,1}}, \quad X_{A2} = \frac{x_{A,2}}{1 - x_{A,2}} = 0.00502$$

Ahora, teniendo en cuenta la pendiente mínima de operación (la que tiene el menor flujo de líquido), se conoce que en teoría el líquido sale en equilibrio con el gas de entrada:

$$X_{A1,max} = X_{Ai}$$

Teniendo en cuenta la relación de equilibrio:

$$y_{A,i} = 0.728 \cdot x_{A,i}$$

Luego,

$$\frac{Y_{Ai}}{1 + Y_{Ai}} = 0.728 \frac{X_{Ai}}{1 + X_{Ai}}$$

En este caso $Y_{Ai} = Y_{A1}$, entonces:

$$X_{Ai} = \frac{\frac{Y_{A1}}{1 + Y_{A1}}}{0.728 - \frac{Y_{A1}}{1 + Y_{A1}}} = \frac{y_{A1}}{0.728 - y_{A1}}$$

$$X_{Ai} = \frac{0.100}{0.728 - 0.100} = 0.159$$

Ahora, la pendiente mínima de la curva de operación será:

$$G_s Y_{A1} + L_s X_{A2} = G_s Y_{A2} + L_s X_{A1}$$

$$\rightarrow \left(\frac{L_s}{G_s}\right)_{min} = \frac{Y_{A2} - Y_{A1}}{X_{A2} - X_{Ai}} = \frac{0.011 - 0.111}{5.02 \cdot 10^{-3} - 0.159} = 0.648$$

Luego,

$$G_s = G_1 \cdot (1 - y_{A1}) = 12.4880 \text{ mol/s}$$

Ahora, se puede hallar el flujo mínimo de líquido:

$$L_{s-min} = G_s \cdot \left(\frac{L_s}{G_s}\right)_{min} = 8.0976 \text{ mol/s}$$

Y, recordando las condiciones de operación, la pendiente de operación será:

$$\left(\frac{L_s}{G_s}\right)_{ope.} = a_i \left(\frac{L_s}{G_s}\right)_{min}$$

Donde: $a_1 = 1.2$, $a_2 = 1.4$, $a_3 = 1.6$, $a_4 = 1.8$

Con la cual encontraríamos cada curva de operación, que tendrá la estructura:

$$Y_A = \left(\frac{L_s}{G_s}\right)_{ope.} (X_A - X_{A2}) + Y_{A2}$$

Ahora, dado al método geométrico usado para hallar la cantidad de platos necesarios, se requiere especificar por completo las composiciones de salida y entrada a la columna, de las que solo falta la condición de salida del líquido (X_{A1}). A manera de ejemplo, si se trabaja con $a_1 = 1.2$, se tiene:

$$X_{A1} = -\frac{Y_{A2} - Y_{A1}}{\left(\frac{L_s}{G_s}\right)_{ope.}} + X_{A2} = 0.1178$$

Cálculo de etapas.

El algoritmo desarrollado en Matlab emula el proceso a implementar para hallar el número de etapas de forma gráfica.

Para cada una de las etapas, la máxima concentración que se tendrá en la fase líquida de salida será la que está en equilibrio con la corriente de la fase de vapor de salida.

Se inicia a trabajar desde las corrientes inferiores de la etapa superior (2), ya que las corrientes superiores de esta etapa (salida de gas y entrada de líquido) ya están totalmente determinadas. De esta manera, para el caso de una etapa ideal, y trabajando de la etapa superior a la inferior, la concentración del líquido que sale de una etapa será la que está en equilibrio con la concentración del gas de salida de esa etapa.

$$y_{A,j} = \frac{Y_{A,j-1}}{1 - Y_{A,j-1}}, \quad X_{A,j} = \frac{y_{A,j}}{m - y_{A,j}}$$

La composición de la corriente de gas de entrada se puede hallar con la ecuación de la curva de operación con la corriente líquida de salida hallada anteriormente, es decir

$$Y_{A,j} = \left(\frac{L_s}{G_s}\right)_{ope.} (X_{A,j} - X_{A2}) + Y_{A2}$$

Con esto, ya se tienen las composiciones de las corrientes que están por encima de la siguiente etapa (entrada de líquido y salida de gas). Note que las concentraciones de salida del líquido y gas estarán en equilibrio, con la cual calcular es posible calcular las concentraciones a la salida de la siguiente etapa.

Al realizar este procedimiento hasta cubrir el total de la línea operatoria es posible adquirir los gráficos 2 y 4, donde es posible ver gráficamente la cantidad de etapas de equilibrio que hay.

Las etapas ideales se cuentan teniendo en cuenta la cantidad de triángulos rectángulos formados. Para los cuatro escenarios no se completa la última etapa; sin embargo, en la vida real es imposible tener etapas a medias o como fracciones, razón por la cual se redondea hasta dicha etapa. De hecho, es posible ver el comportamiento de la composición de la entrada del gas y del líquido en cada etapa, obteniendo las gráficas 3 y 5.

Muestra de cálculo (Punto 3)

Nota: Por términos prácticos el subíndice 1 hace referencia a la parte inferior de la columna y el subíndice 2 hace referencia a la parte superior.

Información suministrada

$$Q_{G1} = 0.3 \frac{m^3}{s}, \quad P = 860 \text{ mmHg}, \quad T = 25^\circ C = 298K$$

$$y_1^{C5} = 0.100, \quad \%Absor = 90\%, \quad x_2^{C5} = 0.005$$

$$y_{C5}^* = 4 \cdot 10^{-5} \cdot \exp(0.0329 \cdot T(K)) \cdot x_{C5}^* = 0.728 \cdot x_{C5}^*$$

$$Etapas = 10, \quad Eficiencia_global = 60\%$$

Cálculo de L min

De igual manera a lo desarrollado inicialmente para los casos anteriores, inicialmente se calcula el flujo molar de entrada del gas G1:

$$G_1 = P * Q_{G1} / (R * T) * 1000 = \frac{114.657 \text{ kPa} * 0.3 \text{ m}^3/\text{s}}{8.3145 \text{ kJ}/\text{kmol} * \text{K} * 298.15 \text{ K}} = 13.8756 \text{ mol/s}$$

En la parte inferior se tiene para la fase gaseosa:

$$Y_{A1} = \frac{y_{A,1}}{1 - y_{A,1}} = \frac{0.100}{1 - 0.100} = 0.11111$$

Y, la composición de salida se puede determinar cómo:

$$\% \text{ Absorción} = \frac{G_s Y_1 - G_s Y_2}{G_s Y_1} = \frac{Y_1 - Y_2}{Y_1}$$
$$\rightarrow Y_2 = (1 - \% \text{ Absor.}) Y_1 = 0.10 \cdot 0.11111 = 0.01111$$

Y, para la fase líquida:

$$X_{A1} = \frac{x_{A,1}}{1 - x_{A,1}}, \quad X_{A2} = \frac{x_{A,2}}{1 - x_{A,2}} = 0.00502$$

Ahora, teniendo en cuenta la pendiente mínima de operación (la que tiene el menor flujo de líquido), se conoce que en teoría el líquido sale en equilibrio con el gas de entrada:

$$X_{A1,max} = X_{Ai}$$

Teniendo en cuenta la relación de equilibrio:

$$y_{A,i} = 0.728 \cdot x_{A,i}$$

Luego,

$$\frac{Y_{Ai}}{1 + Y_{Ai}} = 0.728 \frac{X_{Ai}}{1 + X_{Ai}}$$

En este caso $Y_{Ai} = Y_{A1}$, entonces:

$$X_{Ai} = \frac{\frac{Y_{A1}}{1 + Y_{A1}}}{0.728 - \frac{Y_{A1}}{1 + Y_{A1}}} = \frac{y_{A1}}{0.728 - y_{A1}}$$
$$X_{Ai} = \frac{0.100}{0.728 - 0.100} = 0.159$$

Ahora, la pendiente mínima de la curva de operación será:

$$G_s Y_{A1} + L_s X_{A2} = G_s Y_{A2} + L_s X_{A1}$$
$$\rightarrow \left(\frac{L_s}{G_s} \right)_{min} = \frac{Y_{A2} - Y_{A1}}{X_{A2} - X_{Ai}} = \frac{0.011 - 0.111}{5.02 \cdot 10^{-3} - 0.159} = 0.648$$

Luego,

$$G_s = G_1 * (1 - y_{A1}) = 12.4880 \text{ mol/s}$$

Ahora, se puede hallar el flujo mínimo de líquido:

$$L_{s-min} = G_s * \left(\frac{L_s}{G_s}\right)_{min} = 8.0976 \text{ mol/s}$$

De esta manera, la pendiente de operación será:

$$\left(\frac{L_s}{G_s}\right)_{ope.} = a \left(\frac{L_s}{G_s}\right)_{min}$$

Sin embargo, tal como se especificó anteriormente en la metodología, el flujo de entrada de líquido se va a variar, por lo que no se conoce “a” ni la pendiente de la curva de operación.

Método iterativo – Variación de a

Se implementa un método iterativo en el que se varía la variable “a” desde 1.11 dando saltos de 0.01.

A modo de ejemplo se presentan los cálculos para a = 1.11:

$$\left(\frac{L_s}{G_s}\right)_{ope.} = 1.11 \left(\frac{L_s}{G_s}\right)_{min} = 0.7198$$

Ahora, se requiere especificar por completo las composiciones de salida y entrada a la columna, de las que solo falta la condición de salida del líquido (X_{A1}):

$$X_{A1} = -\frac{Y_{A2} - Y_{A1}}{\left(\frac{L_s}{G_s}\right)_{ope.}} + X_{A2} = 0.1258$$

Además, para la curva de operación, de la que ya se conocen sus extremos, se tiene:

$$Y_A = \left(\frac{L_s}{G_s}\right)_{ope.} (X_A - X_{A2}) + Y_{A2}$$

Ahora, antes de calcular las etapas se debe tomar en cuenta la eficiencia, para lo que se construye una curva llamada “Curva de eficiencia”. Esta reemplaza a la de equilibrio para hallar el número de etapas.

Para determinar esta recta se deben tener dos puntos de esta, los cuales se hallan en el 60% del trayecto sobre las impulsoras desde los extremos de la línea de operación (X_{A1} , Y_{A1}) y (X_{A2} , Y_{A2}). Las impulsoras serán perpendiculares a la curva de operación:

$$m_{imp} = -1/(L_s/G_s) = -1.3894$$

Primero, se halla el punto sobre la impulsora que parte de (X_{A1} , Y_{A1}).

Teniendo en cuenta que esta curva de eficiencia es prácticamente recta, se tiene para la misma:

$$Y = m_{imp} * X + b_{imp}$$

De lo cual, se tiene:

$$b_{imp} = Y_{A1} - m_{imp} * X_{A1} = 0.3111$$

Ahora, dado a que esta recta debe cortar a la curva de equilibrio, se igualan con respecto a X y se halla el Y para ese punto de corte:

$$\frac{Y_{corte} - b_{imp}}{m_{imp}} = \frac{\frac{Y_{corte}}{1 + Y_{corte}}}{m_{equilibrio} - \frac{Y_{corte}}{1 + Y_{corte}}}$$

Con solver se obtiene $\rightarrow Y_{corte} = 0.1042$, $X_{corte} = 0.1489$

Ahora se halla la separación entre este punto y el punto (X_{A1}, Y_{A1}) :

$$Long = \sqrt{(X_{A1} - X_{corte})^2 + (Y_{A1} - Y_{corte})^2} = 0.0085$$

Luego, se calcula la separación entre (X_{A1}, Y_{A1}) y el punto a hallar de la curva de eficiencia como:

$$Long - Ef = Long * 60\% = 0.0055$$

Conociendo esta distancia se puede hallar el punto de interés de la curva de eficiencia con:

$$Long - Ef = \sqrt{(X_{A1} - X_{1Ef})^2 + (Y_{A1} - Y_{1Ef})^2} = \sqrt{(X_{A1} - X_{1Ef})^2 + (Y_{A1} - m_{imp} * X_{1Ef} - b_{imp})^2}$$

Con solver se obtiene $\rightarrow X_{1Ef} = 0.1469$, $Y_{1Ef} = 0.1070$

Ahora se realiza este mismo procedimiento para el otro extremo de la curva de operación (X_{A2}, Y_{A2}) , con lo que se obtiene:

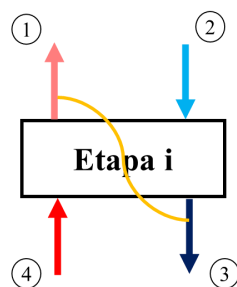
$$X_{2Ef} = 0.0071, Y_{2Ef} = 0.0082$$

Ahora, con estos puntos se puede hallar la curva de eficiencia, dada por:

$$Y = m_{ef} * X + b_{ef} = 0.7066 * X + 0.0031$$

Con esta información ya se puede realizar el cálculo de las etapas.

Este segundo algoritmo desarrollado en Matlab de manera similar al anterior, emula el proceso a implementar para hallar el número de etapas de forma gráfica. Sin embargo, en este caso sin llegar hasta la curva de equilibrio, si no, hasta la curva de eficiencia anteriormente hallada.



De igual manera a los casos anteriores, se inicia a trabajar desde las corrientes inferiores de la etapa superior (2), ya que las corrientes superiores de esta etapa (salida de gas y entrada de líquido) ya están totalmente determinadas. De esta manera, para este caso, y trabajando de la etapa superior a la inferior, la concentración del líquido que sale de una etapa será la que está sobre la curva de eficiencia con la concentración del gas de salida de esa etapa.

$$X_{A,j} = \frac{Y_{A,j} - b_{ef}}{m_{ef}}$$

La composición de la corriente de gas de entrada se puede hallar con la ecuación de la curva de operación con la corriente líquida de salida hallada anteriormente, es decir

$$Y_{A,j} = \left(\frac{L_s}{G_s} \right)_{ope.} (X_{A,j} - X_{A2}) + Y_{A2}$$

Con esto, ya se tienen las composiciones de las corrientes que están por encima de la siguiente etapa (entrada de líquido y salida de gas). Note que las concentraciones de salida del líquido y gas estarán sobre la curva de eficiencia, con la cual calcular es posible calcular las concentraciones a la salida de la siguiente etapa.

Este procedimiento se hace continuamente hasta abarcar el rango de la curva de operación.

Para el ejemplo dado ($a = 1.11$) se obtuvieron 19 etapas necesarias, por lo que el valor de “a” se sigue aumentando hasta encontrar la cantidad de etapas buscadas.

Resultados

Para el punto 1, en el que se trabajó con 4 flujos de líquido distintos a temperatura de proceso de 25°C se han obtenido los resultados presentados en la figura 2, resultados que se encuentran resumidos en la tabla 1.

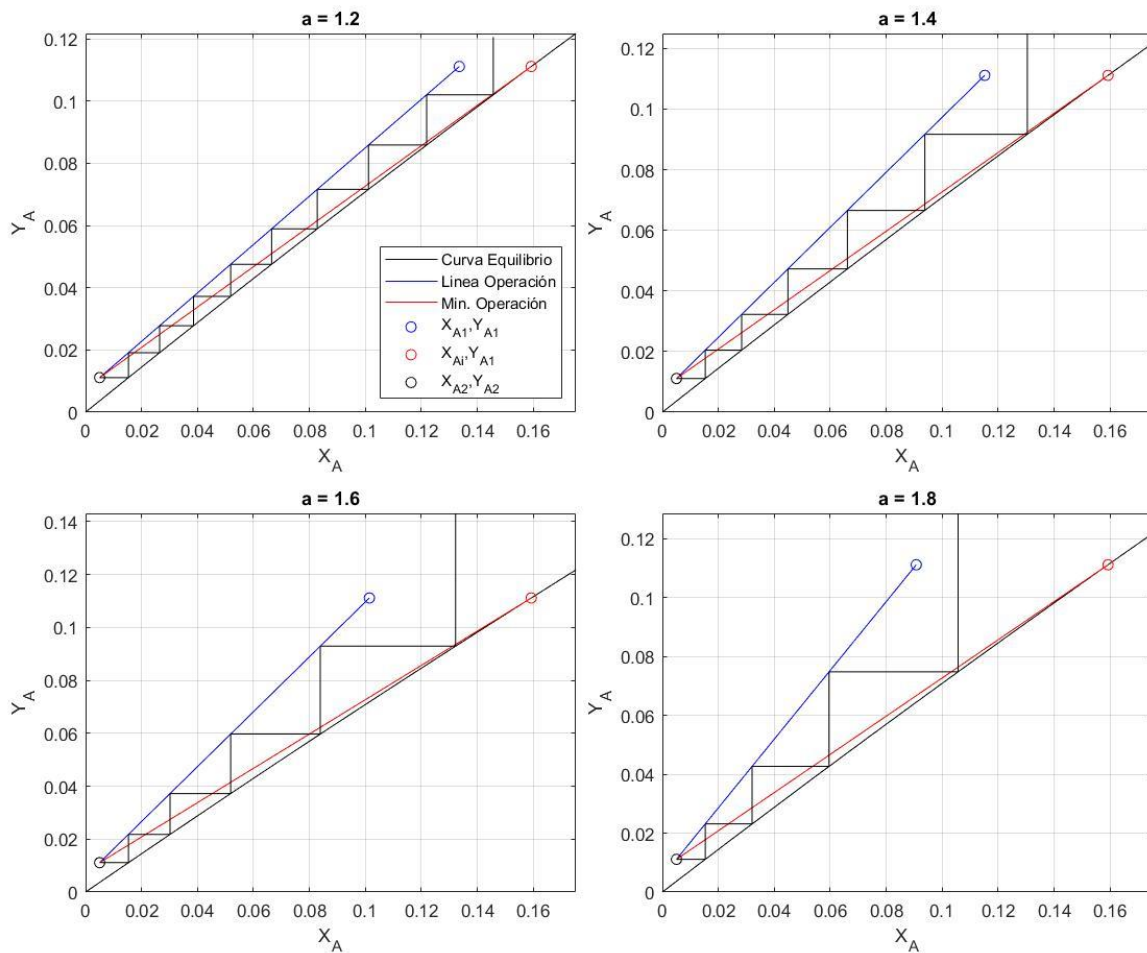


Figura 2. Etapas halladas por el método gráfico a 25°C para las relaciones de flujo 1.2, 1.4, 1.6 y 1.8.

Valor de a (L/Lmin)	1,2	1,4	1,6	1,8
Número de etapas de equilibrio	9	6	5	4

Tabla 1. Etapas halladas por el método gráfico a 25°C para las relaciones de flujo 1.2, 1.4, 1.6 y 1.8.

Complementariamente, también se han obtenido los perfiles de concentración del pentano en cada fase a lo largo de la columna. De nuevo, para los 4 flujos de líquido distintos a temperatura de proceso de 25°C. Estos perfiles se presentan en la figura 3.

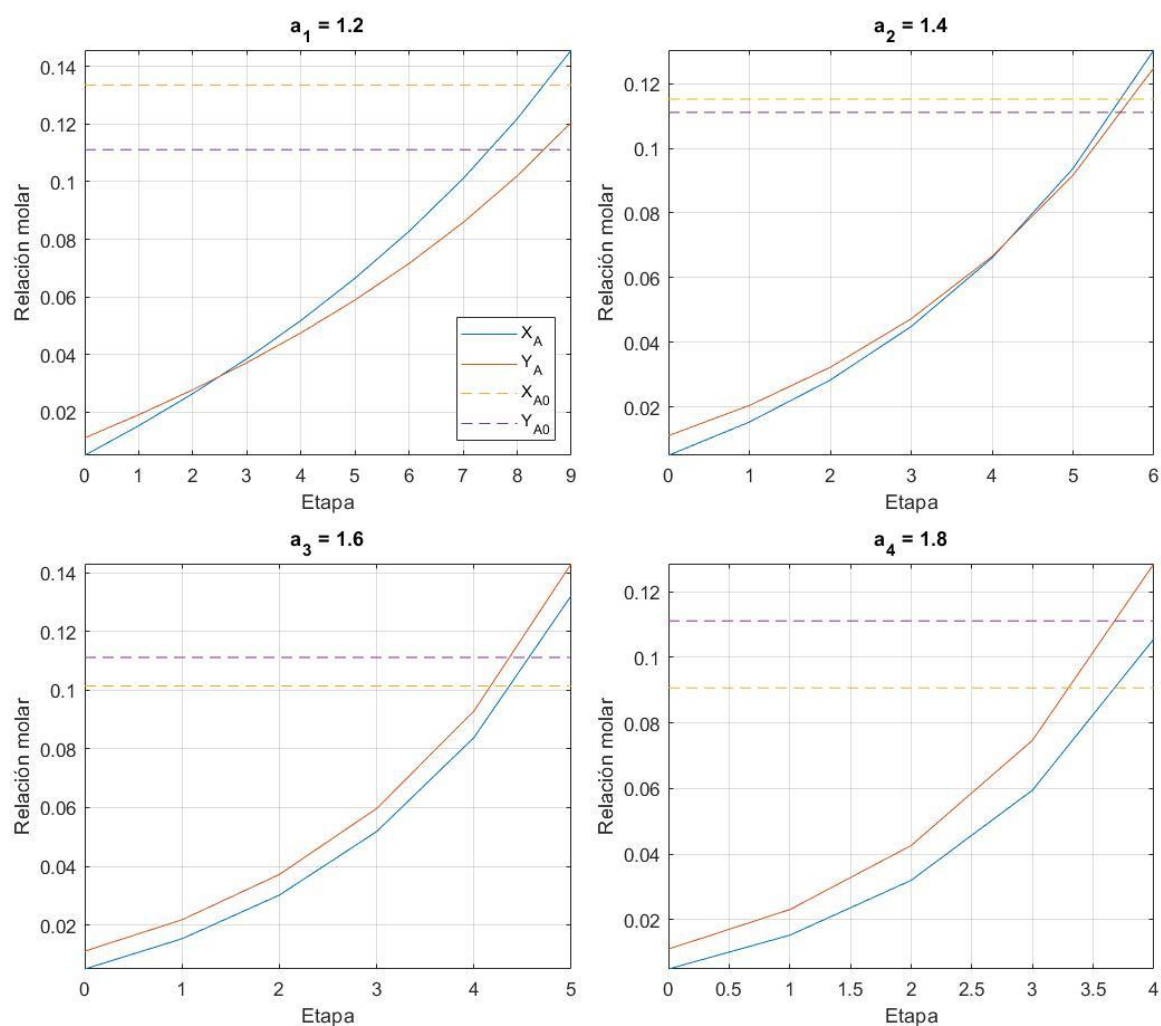


Figura 3. Perfil de concentraciones a 25°C para las relaciones de flujo 1.2, 1.4, 1.6 y 1.8.

Para el punto 2, con un procedimiento muy similar al realizado para el primer punto, se trabajó de nuevo con los mismos 4 flujos de líquido distintos, pero esta vez a temperatura de proceso de 28°C. Los resultados obtenidos son presentados en la figura 4, y son resumidos en la tabla 2.

Valor de a (L/Lmin)	1,2	1,4	1,6	1,8
Número de etapas de equilibrio	9	6	5	4

Tabla 2. Etapas halladas por el método gráfico a 28°C para las relaciones de flujo 1.2, 1.4, 1.6 y 1.8.

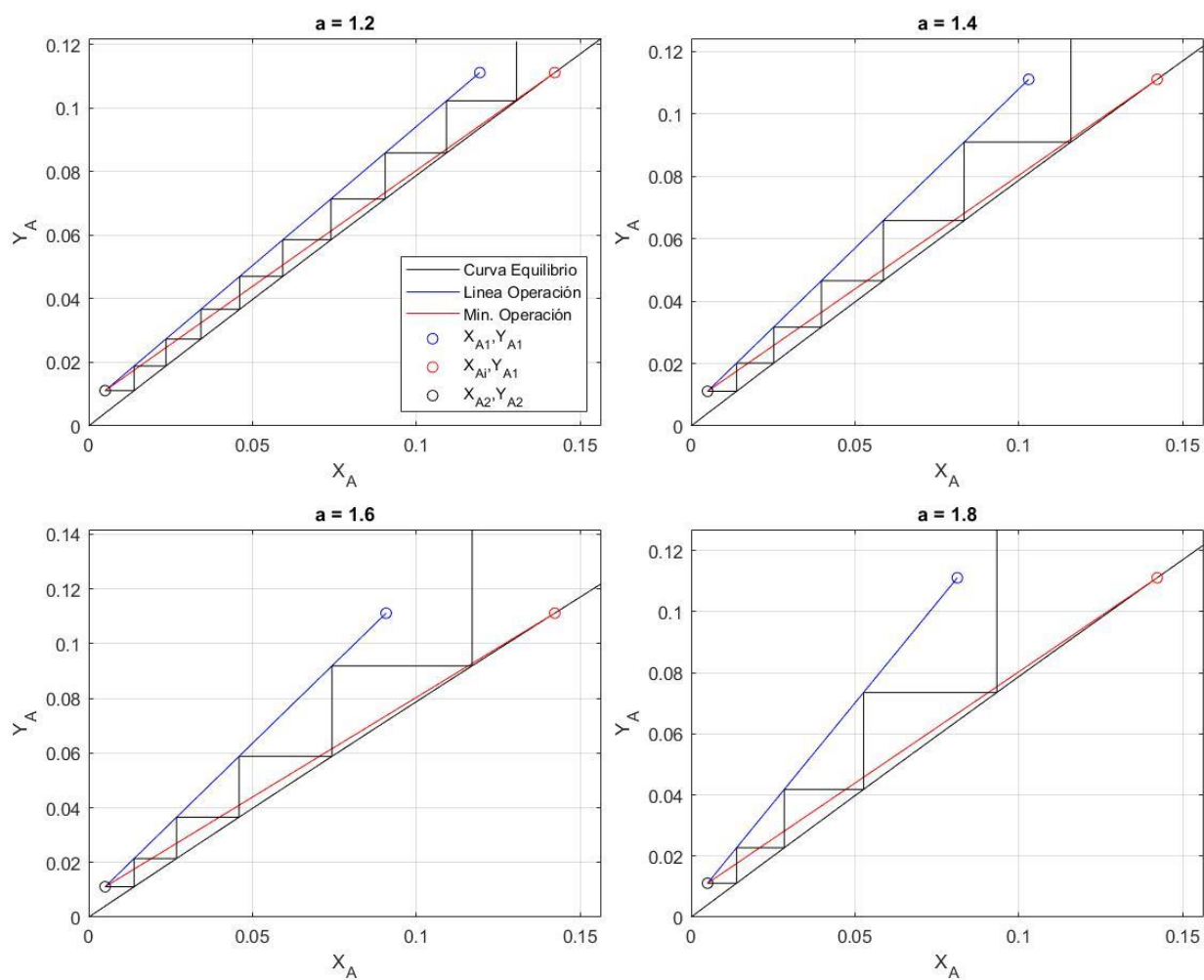


Figura 4. Etapas halladas por el método gráfico a 28°C para las relaciones de flujo 1.2, 1.4, 1.6 y 1.8.

De nuevo, a manera de complemento, se han obtenido los perfiles de concentración para el pentano en cada fase a lo largo de las etapas. Esto se presenta en la figura 5.

Para el punto 3, el algoritmo cuya metodología se explicó anteriormente dio como resultado que con una eficiencia del 60% se logra cumplir el objetivo de separación en 10 etapas con un flujo de líquido 1.35 veces el flujo mínimo. La representación de estas etapas y el perfil de concentración a través de la columna se encuentran en la figura 6.

De manera adicional, en la figura 7 se representa la tendencia del número de etapas necesarias con eficiencia general del 60% para lograr el objetivo de separación.

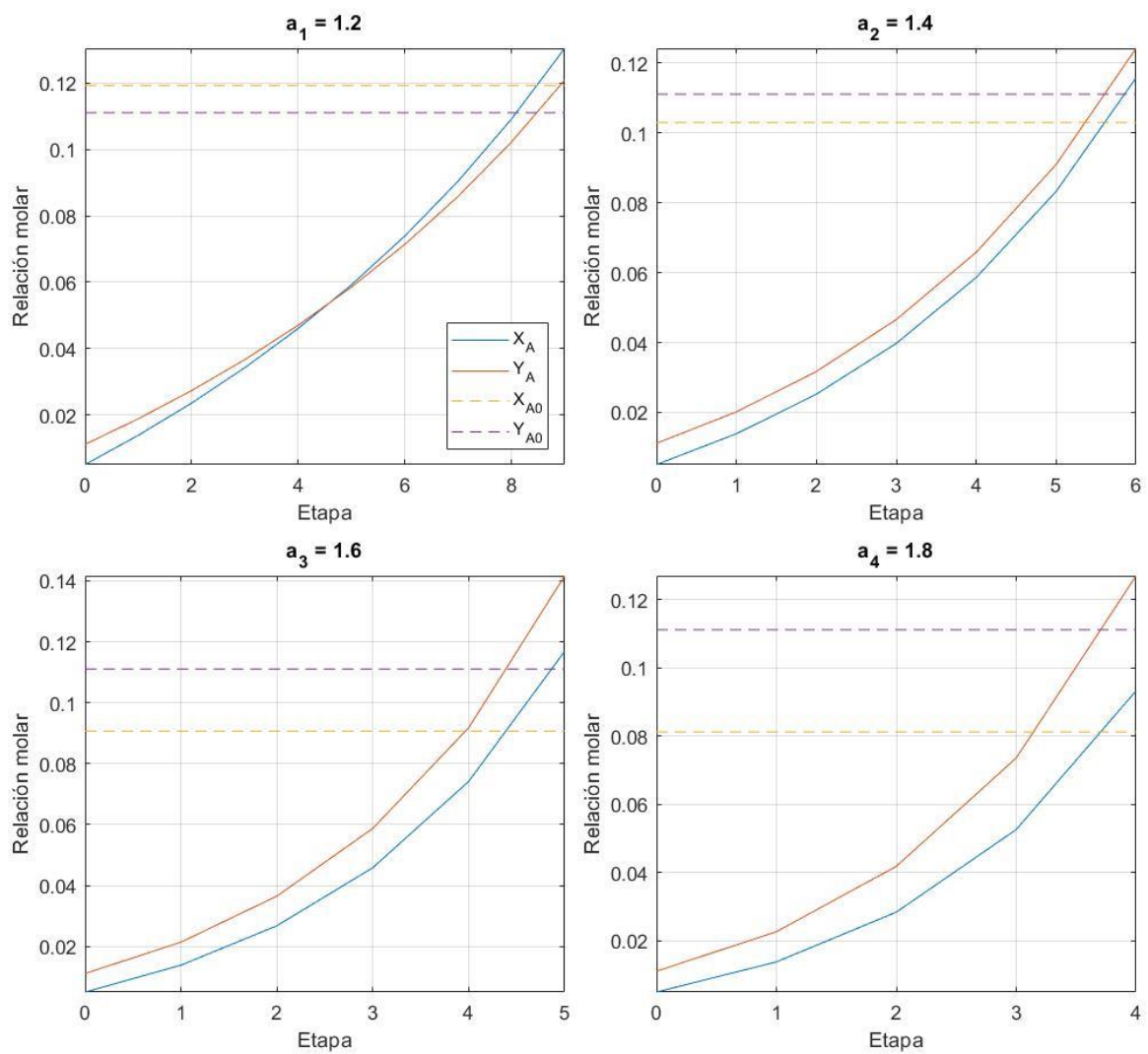


Figura 5. Perfil de concentraciones a 28°C para las relaciones de flujo 1.2, 1.4, 1.6 y 1.8.

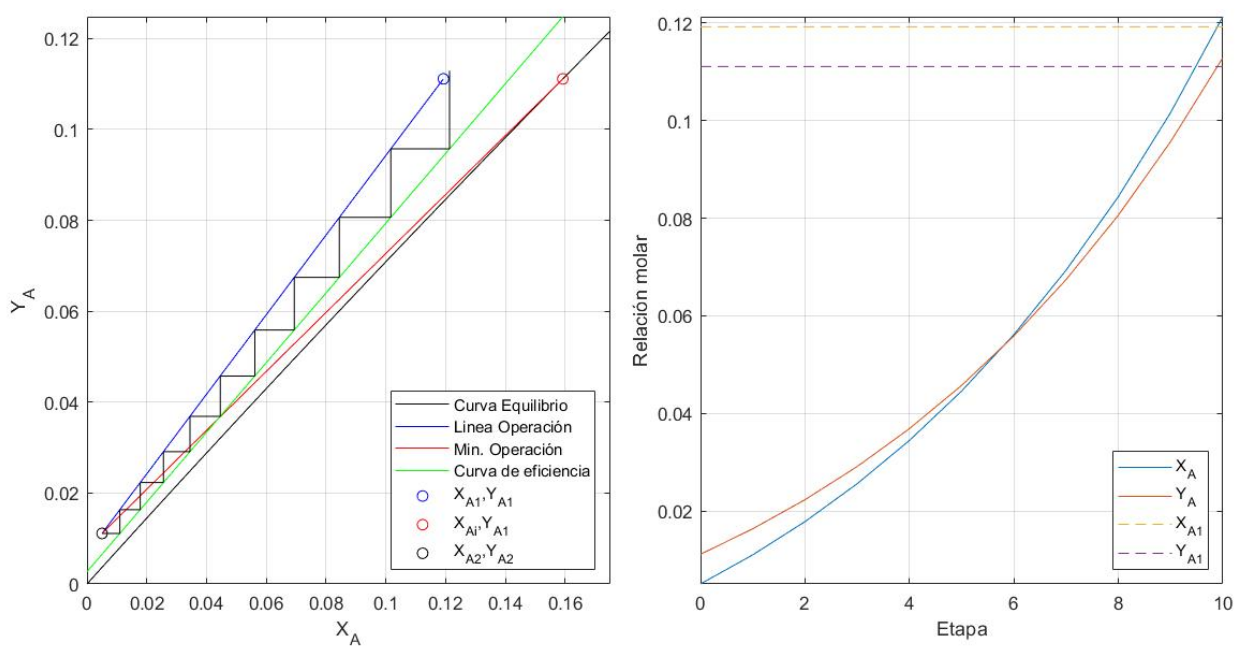


Figura 6. Etapas y perfil de concentraciones con una eficiencia del 60% a 25°C para $a = 1.35$.

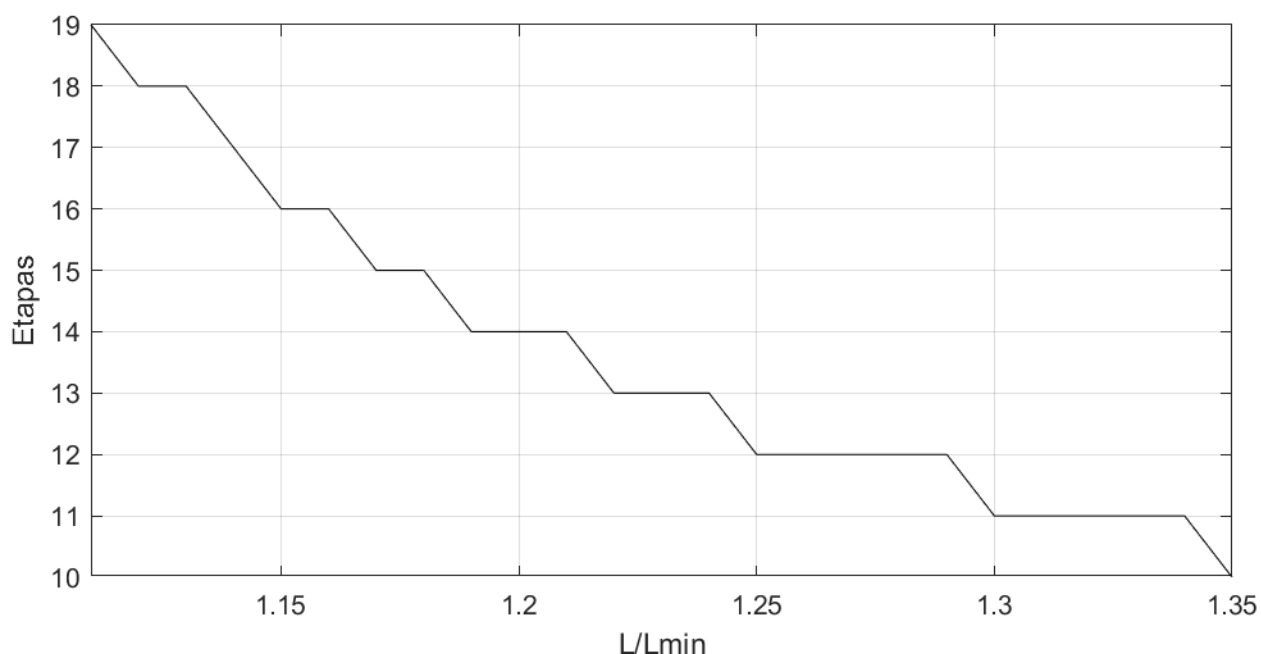


Figura 7. Número de etapas necesarias con eficiencia del 60% a 25 °C variando “a” (L/Lmin).

Para poder hacer un análisis más completo con respecto al efecto de la temperatura en el sistema, se han realizado cálculos a diversas temperaturas con mayor separación entre sí (25, 35, 45 y 55 °C), ya que entre 25 y 28 °C se tiene un pequeño cambio de flujos y concentraciones, pero el cambio es pequeño, por lo que no es visible en el número de etapas. Para estos nuevos cálculos se ha fijado la relación entre el flujo y el flujo mínimo de líquido a 1.2.

Estos resultados se presentan en la figura 8 y también se encuentran tabulados en la tabla 3.

Temperatura (°C)	25	35	45	55
Etapas ideales	9	9	10	14
Flujo de líquido (mol/s)	9.72	13.85	19.62	27.82
Flujo de gas (mol/s)	12.49	12.08	11.70	11.35

Tabla 3. Condiciones de operación para las temperaturas 25, 35, 45 y 55 °C con P y a cte.

Del mismo modo, para poder realizar un análisis con respecto al cambio de la presión, se han realizado cálculos a cuatro presiones distintas (50, 100, 200 y 300 kPa). Todos los casos con T = 25 °C y a =1.2. Los resultados se encuentran en la tabla 4 y en la figura 9.

Presión (kPa)	50	100	200	300
Etapas ideales	9	9	9	9
Flujo de líquido (mol/s)	4.24	8.47	16.95	25.42
Flujo de gas (mol/s)	5.45	10.89	21.78	32.67

Tabla 4. Condiciones de operación para las presiones 50, 100, 200 y 300 kPa con T y a cte.

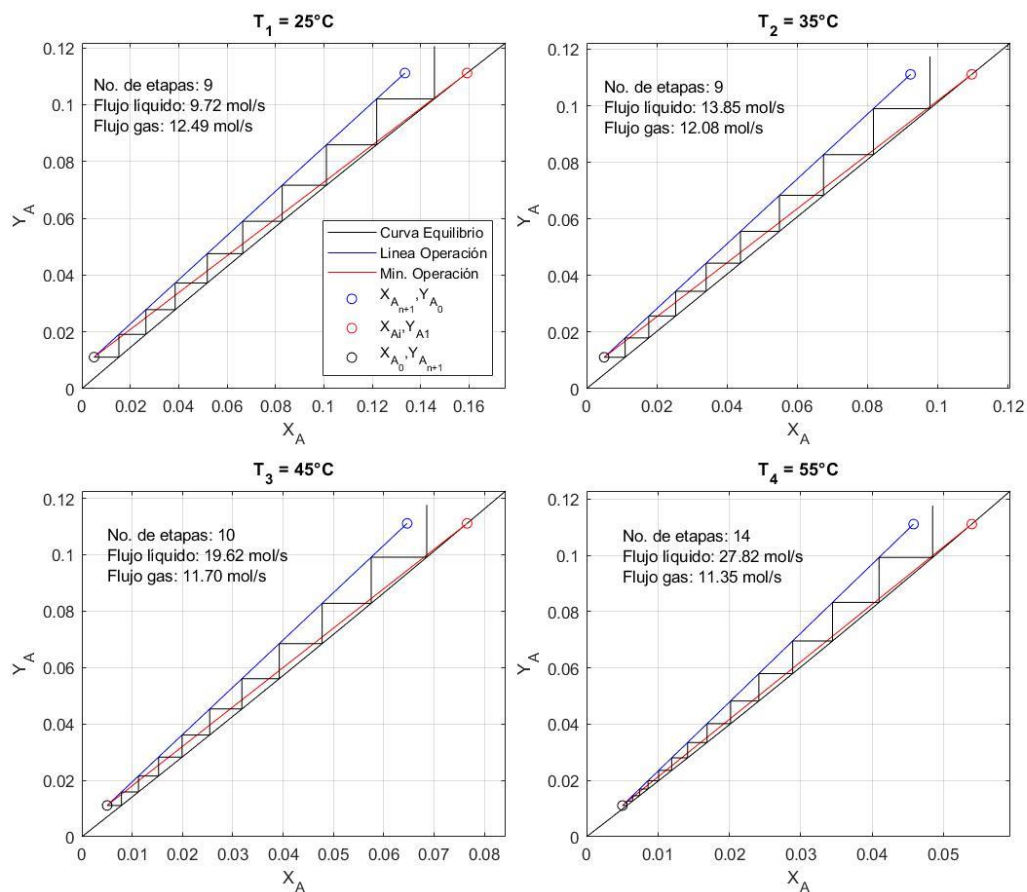


Figura 8. Número de etapas operando con temperaturas de 25, 35, 45 y 55 °C con P y a cte.

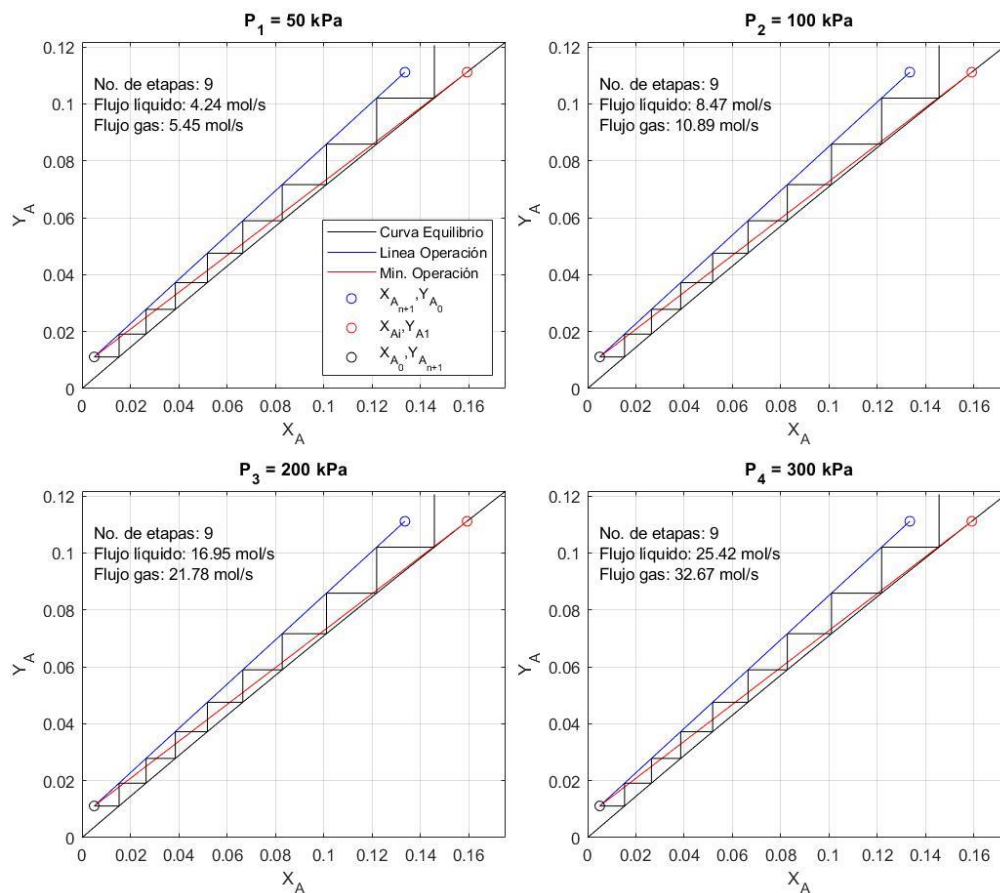


Figura 9. Número de etapas operando con presiones de 50, 100, 200 y 300 kPa con T y a cte.

Análisis de datos

Se puede observar que conforme sea mayor el factor de incremento del flujo con respecto al flujo mínimo de líquido, menor número de etapas serán requeridas en el proceso; esto se debe a que al ser la pendiente de la curva operatoria L_s/G_s y, como se está incrementando el valor de esta, tenemos como consecuencia un incremento en el distanciamiento de la curva de operación con la curva de equilibrio, resultando en la disminución de etapas.

Al alejarse de la curva de equilibrio (porque la pendiente de la curva operatoria es mayor) se genera una corriente de líquido de salida con concentración más pequeña, esto es debido a que se estará incrementando la cantidad de solvente de la corriente líquida y, como la cantidad de soluto presente en la corriente gaseosa sigue siendo la misma, se diluye aún más el soluto en el solvente líquido haciendo que reduzca su concentración. Representando un mayor costo más adelante en dado caso que se requiera extraer el soluto de la fase líquida, además de que se aumentaría el radio necesario de la columna, incrementando aún más el costo de la operación.

El incremento de temperatura para el proceso genera un cambio en la curva de equilibrio, incrementando su pendiente, lo cual puede resultar en una disminución de la solubilidad del soluto en el líquido; también representaría un aumento en el flujo mínimo de líquido y por ende también aumentaría la pendiente de la curva operatoria. Como los valores de concentración de la parte superior de la columna no varían, el aumento de la pendiente en la curva de equilibrio generaría un mayor acercamiento a este punto, lo cual puede llegar a generar un incremento en el número de etapas. Pero si el cambio de la temperatura es pequeño (por ejemplo, de 25°C a 28°C), no se verá un gran cambio en los resultados.

No obstante, es imprescindible delimitar el rango de temperaturas para los cuales podemos seguir trabajando con las composiciones de entrada de las dos fases y la concentración de salida del gas. Teniendo en cuenta que estos parámetros permanecen estáticos mientras variamos las temperaturas, se puede dar el caso en el que se suba la curva de equilibrio (incrementando temperatura) a tal punto en el que la coordenada asociada a la parte superior de la columna quede debajo de la curva de equilibrio, haciendo la transferencia de la fase liviana a la pesada imposible. Además, con base en la leve concavidad de la curva de equilibrio, para un rango de temperaturas, la composición máxima (flujo líquido mínimo) puede generar que la curva de operación mínima intercepte al equilibrio antes de llegar a dicha composición, siendo incoherente.

Un proceso real no presenta un comportamiento como el planteado para los primeros dos incisos, en los cuales no se hacía uso de la eficiencia, por lo tanto, las curvas referentes a las etapas tienen contacto con la curva de equilibrio a diferencia del caso en el cual se hace uso de la eficiencia, donde se muestra que el acercamiento a la curva de equilibrio de estas curvas esté delimitado por dicha eficiencia. La distancia existente entre la curva operatoria y la curva de equilibrio es mayor comparada con la presentada entre la curva operatoria y la curva generada por la eficiencia, es decir, al realizar el proceso del cálculo de las etapas se obtendrá un mayor número de etapas necesarias para lograr el objetivo de separar cierta cantidad de soluto del gas. Todo esto siendo planteado a partir de un análisis gráfico.

Se observa el caso en el cual se cambia la presión de operación, para el cual se muestra que esta variable no altera los resultados anteriormente obtenidos en las gráficas, esto se debe principalmente a que la curva de equilibrio planteada en el ejercicio no está en función en la presión, es decir, el desarrollo del ejercicio no está en función de esta, ya que el proceso para determinar todos los datos parte de la información obtenida en el equilibrio. Cabe resaltar que los flujos cambiarán de magnitud, pues se tiene como referencia el flujo del gas el cual es volumétrico, el que al pasarlo a unidades molares se ve muy influenciado por la presión, por lo tanto, el flujo líquido necesario para lograr la composición deseada a la salida de la torre será diferente, sin embargo, la relación entre estos será la misma respecto a los 860 mmHg pues este valor se obtiene a partir de la curva de equilibrio.

Por otro lado, examinando las gráficas del perfil de las relaciones molares en cada fase del soluto en función de las etapas, podemos evidenciar que, a medida que las etapas aumentan, se descende en la columna de separación, yendo desde la menor composición posible hasta la mayor en las dos fases. Note que incluso si se cruzan las composiciones, no se viola el equilibrio ni se niega la migración de moléculas entre las fases, siendo

el factor determinante no superar la composición del líquido en equilibrio con la composición de la corriente gaseosa.

Conclusiones

En el problema, la presión no altera los resultados obtenidos en el proceso de cálculo debido a que la relación de equilibrio utilizada no depende de esta, sin embargo, en un caso real, la presión sí altera la curva de equilibrio, pues el equilibrio de fases está en función de la presión y la temperatura, donde resulta evidente que las propiedades de los líquidos dependen fundamentalmente de la temperatura (porque son casi incompresibles) y en los gases se depende tanto de la temperatura como de la presión.

En el desarrollo del problema se plantean diferentes factores a multiplicar para el flujo mínimo de líquido, ya que no es posible realizar el proceso con el flujo mínimo de separación porque entonces resultaría un número de etapas infinito, sin embargo, este factor no puede ser significativamente grande, pues no resultaría rentable a nivel económico, ya que un alto flujo de líquido incrementaría el diámetro de la torre, ocasionando altos costos, además se lograría una baja concentración en el líquido a la salida de la torre, y esto generaría problemas en caso de necesitar purificar el solvente con el fin de reutilizarlo, caso que es común en la industria. Por lo tanto, se debe optimizar el proceso de tal forma que se logre el flujo de líquido acertado en el que se logre el objetivo planteado para la concentración del soluto en el gas a la salida de la torre, sin afectar de manera negativa el desarrollo del proceso ni el aspecto económico.

La eficiencia del sistema tiene una importancia a la hora del diseño debido a que dependiendo que tan grande sea, esta definirá un incremento del número de etapas con respecto a las etapas ideales (es decir con eficiencia del 100%) porque ahora el porcentaje de absorción que puede darse en cada etapa disminuirá; esto también significa un aumento en la altura de la columna, representando más costos de diseño y construcción. Esto representa una relación inversamente proporcional entre la eficiencia y el costo de diseño. A menor eficiencia del proceso, mayores etapas son necesarias, y, por lo tanto, mayor costo.

Además, en este contexto, una mayor concentración en la corriente líquida que en la gaseosa no implica directamente que el flujo va a ir hacia la fase liviana. Esto se debe a que la dirección de transferencia no busca igualar la concentración en cada fase, si no, igualar la fugacidad en cada fase, la cual es la que rige a la ecuación del equilibrio.