

GUÍA 5y6 - Destilación

Problema 1

1° Cuatrimestre - 2025

Enunciado

Se desea diseñar una columna de destilación para separar dos productos A y B con volatilidad relativa 4.

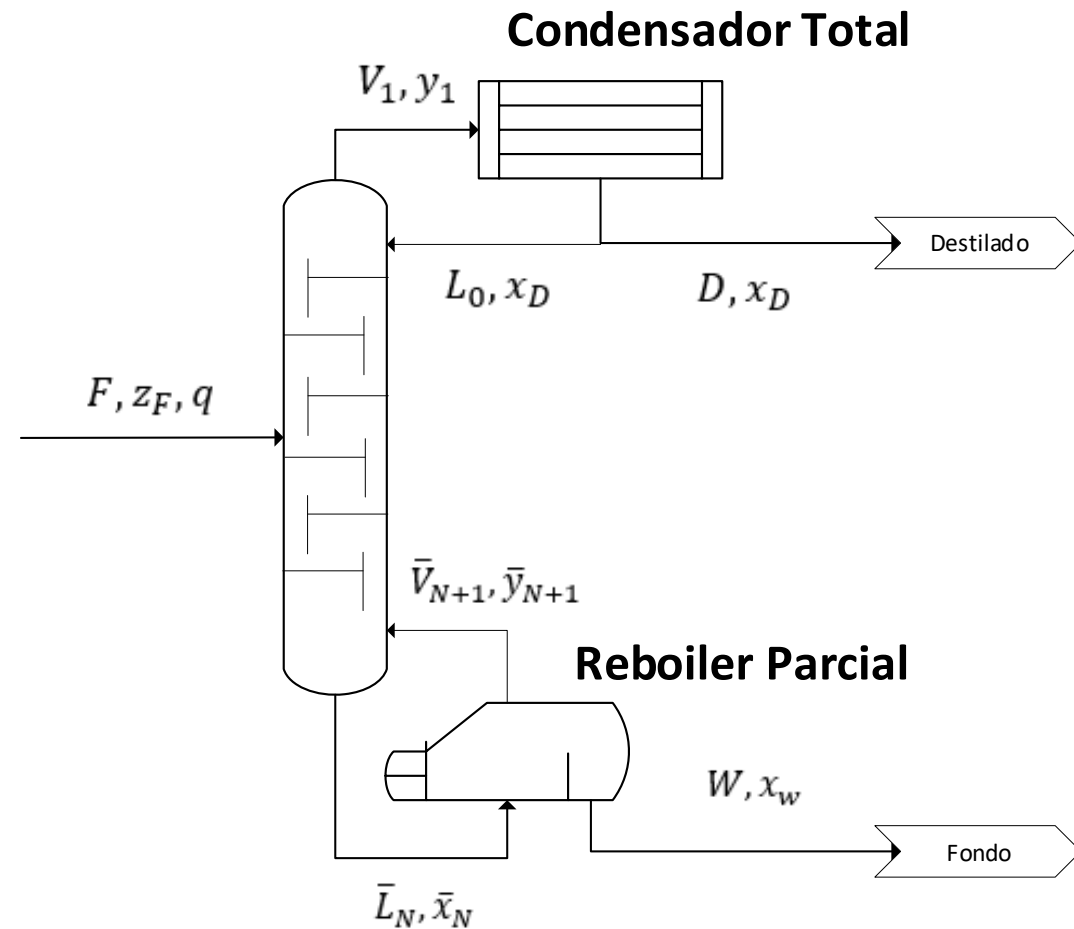
Se deben obtener 100 kmol/h de destilado con una concentración molar de 0,95 a partir de una corriente líquida saturada con 35% molar de A.

Para ello se adquirirá un reboiler parcial adecuado y se dispone de un condensador total que puede eliminar 120.000 kcal/h ($\lambda = 400$ kcal/kmol), y permite retornar a la torre una corriente de reflujo saturada.

- a. Si la concentración de producto de fondo no debe superar el 5% molar de A, calcular el número de etapas requerido y la ubicación del plato de alimentación, y el agua de enfriamiento requerida.
- b. Si se reemplaza el reboiler por vapor vivo saturado, con la torre ya construida, manteniendo constantes las condiciones de entrada de la alimentación, de salida del destilado y el reflujo operativo, ¿cuál es la concentración del producto de fondo?

Datos

- **Columna de Destilación:** Separa A y B con $\alpha = 4$
- **D = 100 kmol/h**
- **$x_D^A = 0,95$**
- **F líquido saturado**
- **$x_F^A = 0,35$**
- Reboiler Parcial
- Condensador Total $\rightarrow Q = 120\ 000$ kcal/h
- $\lambda = 400$ kcal / kmol



Resolución ítem a

a. Calcular N° etapas, plato de alimentación, y agua de enfriamiento requerida para $X_W^A < 5\%$.

Lo primero que vamos a analizar es el dato de volatilidad relativa:

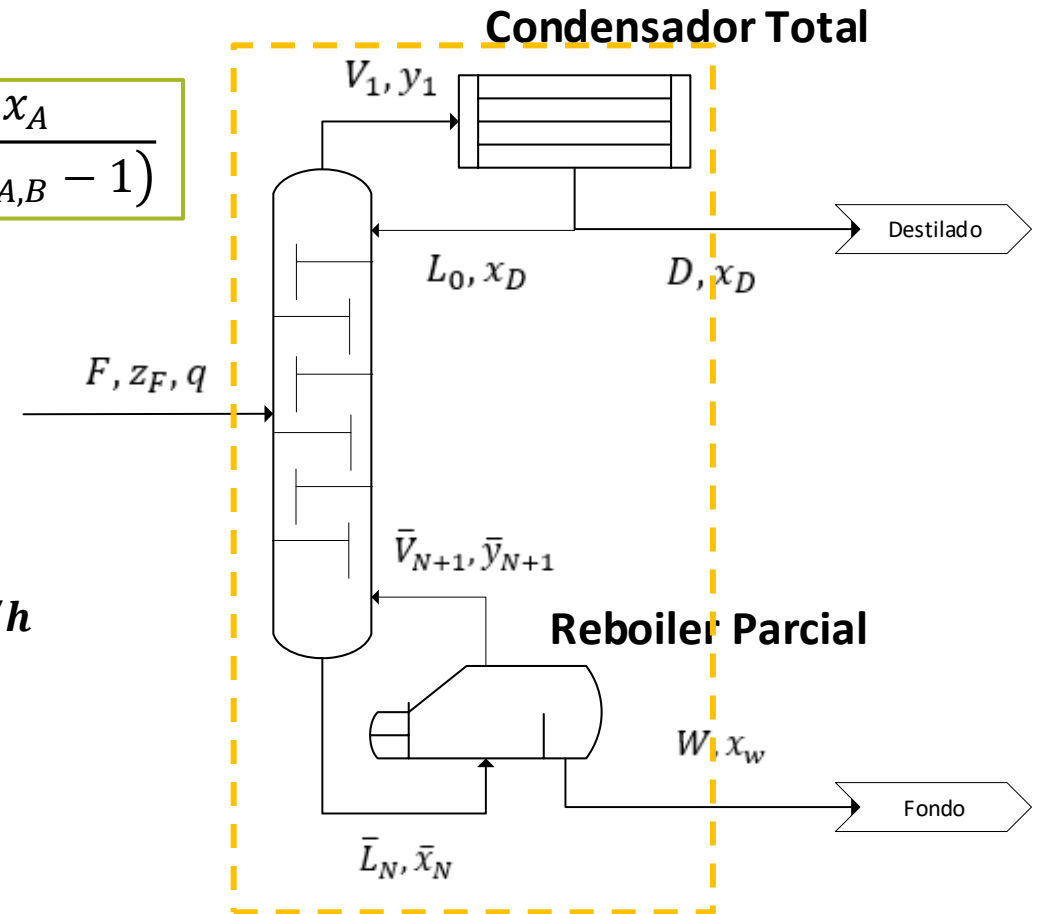
$$\alpha_{A,B} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{m_a}{m_B} = \frac{y_A/x_A}{y_B/x_B} = \frac{y_A}{1-y_A} \cdot \frac{1-x_A}{x_A} \rightarrow y_A = \frac{\alpha_{A,B} \cdot x_A}{1 + x_A \cdot (\alpha_{A,B} - 1)}$$

Ahora que tenemos el equilibrio, planteamos el BMG y BMP:

$$\begin{cases} F = D + W \\ z_F \cdot F = x_D \cdot D + x_W \cdot W \end{cases}$$

$$W = D \cdot \left(\frac{z_F - x_D}{x_W - z_F} \right) = 100 \frac{\text{kmol}}{\text{h}} \cdot \left(\frac{0,35 - 0,95}{0,05 - 0,35} \right) = 200 \text{ kmol/h}$$

$$F = D + W = 100 \text{ kmol/h} + 200 \text{ kmol/h} = 300 \text{ kmol/h}$$



Resolución ítem a

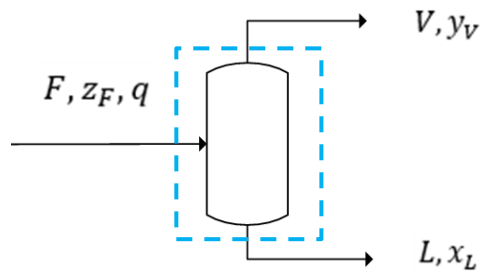
a. Calcular N° etapas, plato de alimentación, y agua de enfriamiento requerida para $X_W^A < 5\%$.

Ahora vamos a analizar la condición de alimentación (recta q):

$$q \stackrel{\text{def}}{=} L/F$$

- Líquido saturado $\rightarrow q = 1$
- Vapor saturado $\rightarrow q = 0$
- Líquido sub-enfriado $\rightarrow q > 1$
- Vapor sobrecalentado $\rightarrow q < 0$

Al ingresar a la columna, se produce un **Flash Isotérmico**:

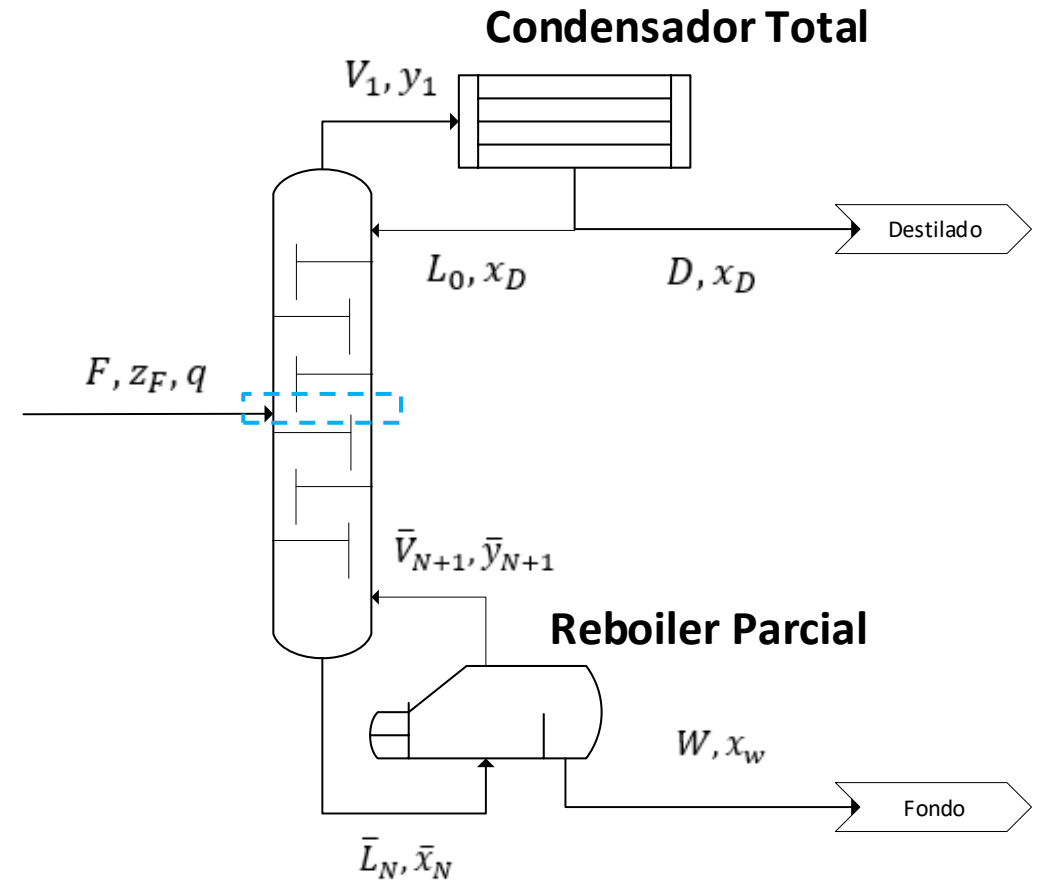


$$z_F \cdot F = x_L \cdot L + y_V \cdot V$$

$$z_F = x_L \cdot q + y_V \cdot (1 - q)$$

$$y = \frac{z_F}{1 - q} - x \cdot \left(\frac{q}{1 - q} \right)$$

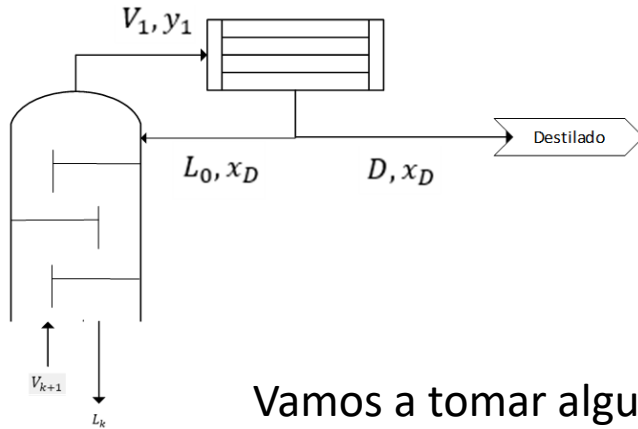
Vamos a utilizar esta ecuación para ubicar el punto óptimo para la alimentación.



Resolución ítem a

a. Calcular N° etapas, plato de alimentación, y agua de enfriamiento requerida para $X_W^A < 5\%$.

Analizaremos ahora la parte superior de la columna (zona de rectificación o enriquecimiento):



$$\begin{cases} V_{k+1} = L_k + D \\ V_{k+1} \cdot y_{k+1} = L_k \cdot x_k + D \cdot x_D \end{cases}$$

$$y_{k+1} = \frac{L_k}{V_{k+1}} \cdot x_k + \frac{D}{V_{k+1}} \cdot x_D$$

Vamos a tomar algunas suposiciones para este tipo de operaciones de transferencia de masa:

- Entalpías de vaporización de las mezclas, similares para todo el rango de composiciones
- Transferencia equimolar: plato a plato se evapora lo mismo que condensa

Nos permite considerar los caudales L_i y V_i constantes en cada zona de la torre

Definimos el Reflujo Externo: $R = \frac{L_0}{D} \cong \frac{L}{D} \Rightarrow y_{ROS} = \frac{L}{V} \cdot x_{ROS} + \frac{D}{V} \cdot x_D = \frac{L/D}{(L+D)/D} \cdot x_{ROS} + \frac{D/D}{(L+D)/D} \cdot x_D$

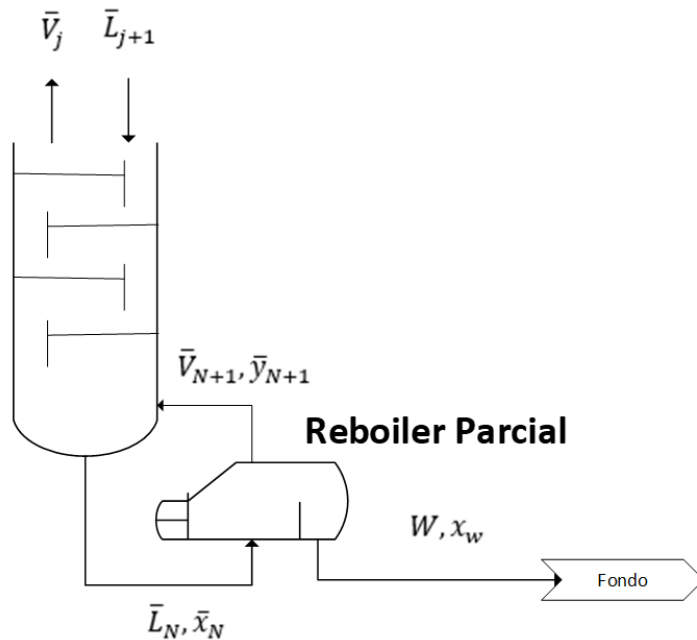
$$y_{ROS} = \frac{R}{R+1} \cdot x_{ROS} + \frac{x_D}{R+1}$$

Recta de Operación Superior (ROS)

Resolución ítem a

a. Calcular N° etapas, plato de alimentación, y agua de enfriamiento requerida para $X_W^A < 5\%$.

La parte inferior de la columna (zona de agotamiento o *stripping*):



$$\begin{cases} \bar{V}_j + W = \bar{L}_{j+1} \\ \bar{V}_j \cdot y_j + W \cdot x_w = \bar{L}_{j+1} \cdot x_{j+1} \end{cases}$$

$$y_j = \frac{\bar{L}_{j+1}}{\bar{V}_j} \cdot x_{j+1} - \frac{W}{\bar{V}_j} \cdot x_w$$

Tomando las mismas consideraciones que hicimos para la ROS:

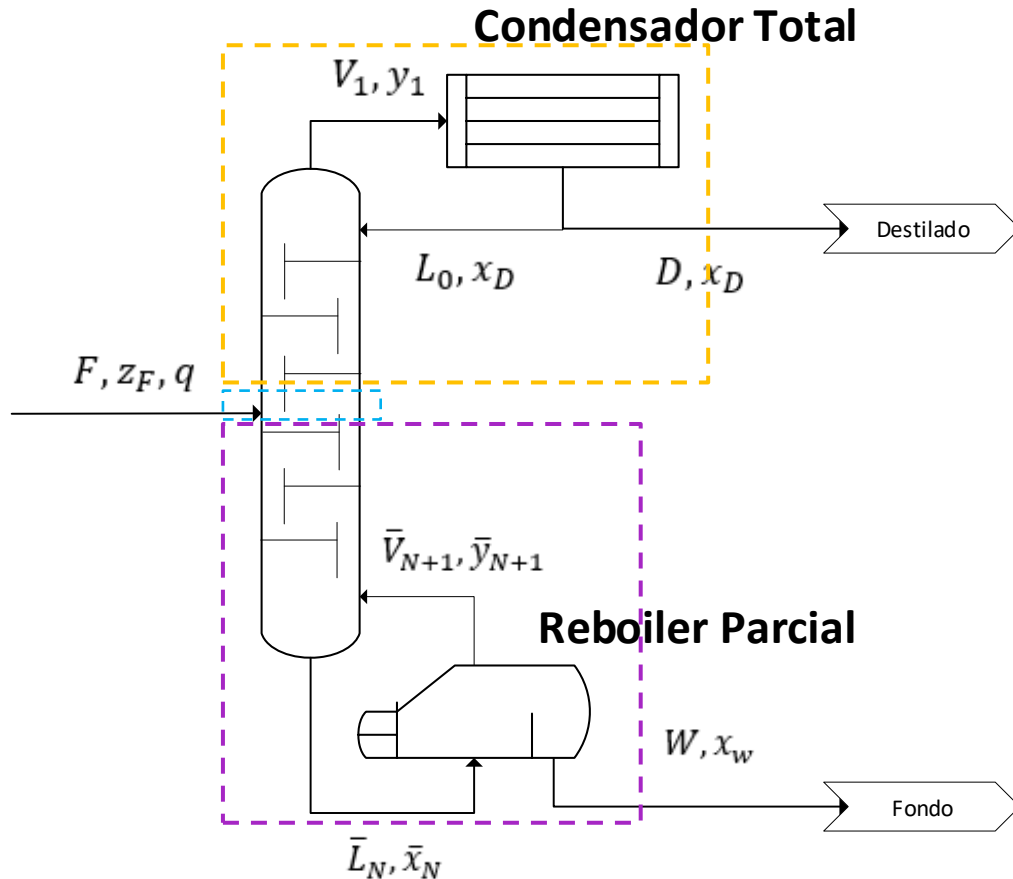
$$y_{ROI} = \frac{\bar{L}}{\bar{V}} \cdot x_{ROI} - \frac{W}{\bar{V}} \cdot x_w$$

Recta de Operación Inferior (ROI)

Resolución ítem a

a. Calcular N° etapas, plato de alimentación, y agua de enfriamiento requerida para $X_W^A < 5\%$.

Ahora vamos a intentar graficar las rectas que obtuvimos:



$$y_{ROS} = \frac{R}{R+1} \cdot x_{ROS} + \frac{x_D}{R+1}$$

$$y = \frac{z_F}{1-q} - x \cdot \left(\frac{q}{1-q} \right)$$

$$y_{ROI} = \frac{\bar{L}}{\bar{V}} \cdot x_{ROI} - \frac{W}{\bar{V}} \cdot x_W$$

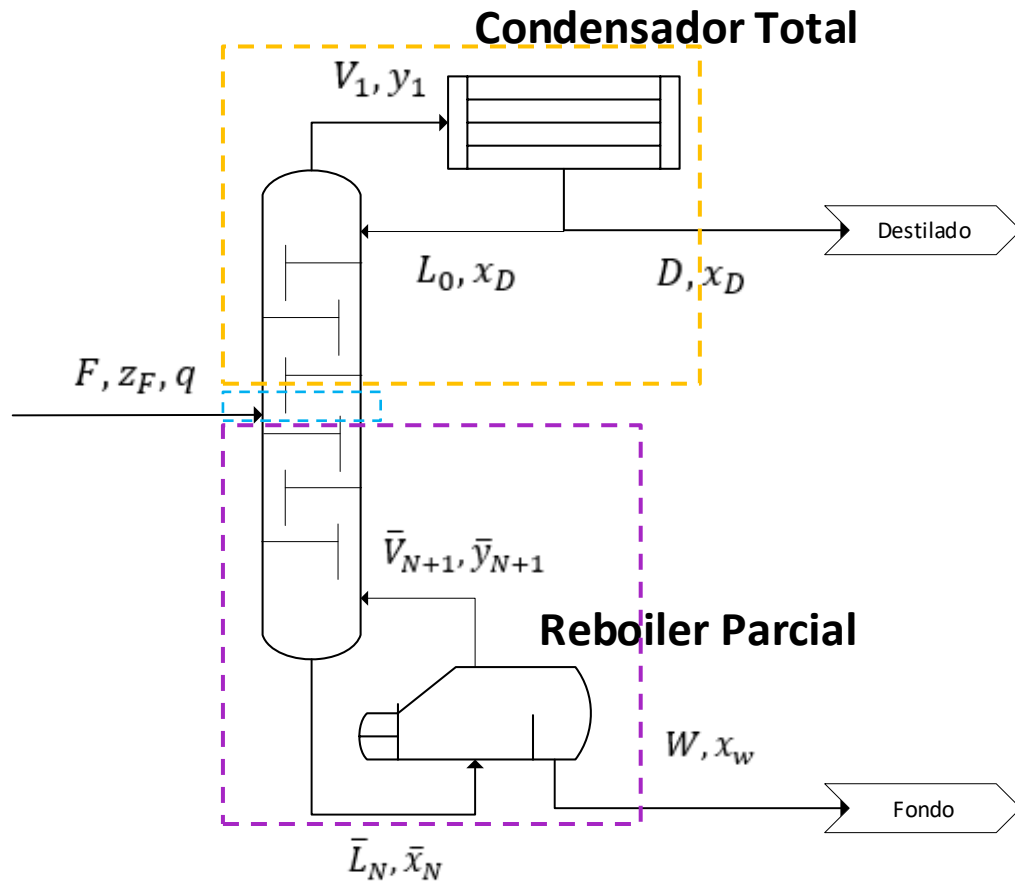
Y el equilibrio:

$$y_A = \frac{\alpha_{A,B} \cdot x_A}{1 + x_A \cdot (\alpha_{A,B} - 1)}$$

Resolución ítem a

a. Calcular N° etapas, plato de alimentación, y agua de enfriamiento requerida para $X_W^A < 5\%$.

Ahora vamos a intentar graficar las rectas que obtuvimos:



$$y_{ROS} = \frac{R}{R+1} \cdot x_{ROS} + \frac{x_D}{R+1}$$

Utilizaremos el dato del calor del Condensador para obtener los caudales internos de la parte superior de la columna:

$$V_1 = \frac{Q_{cond}}{\lambda} = \frac{120\,000 \text{ kcal/h}}{400 \text{ kcal/kmol}} = 300 \text{ kmol/h}$$

Planteamos el Balance de Masa en el Condensador:

$$L_0 = V_1 - D = 200 \text{ kmol/h}$$

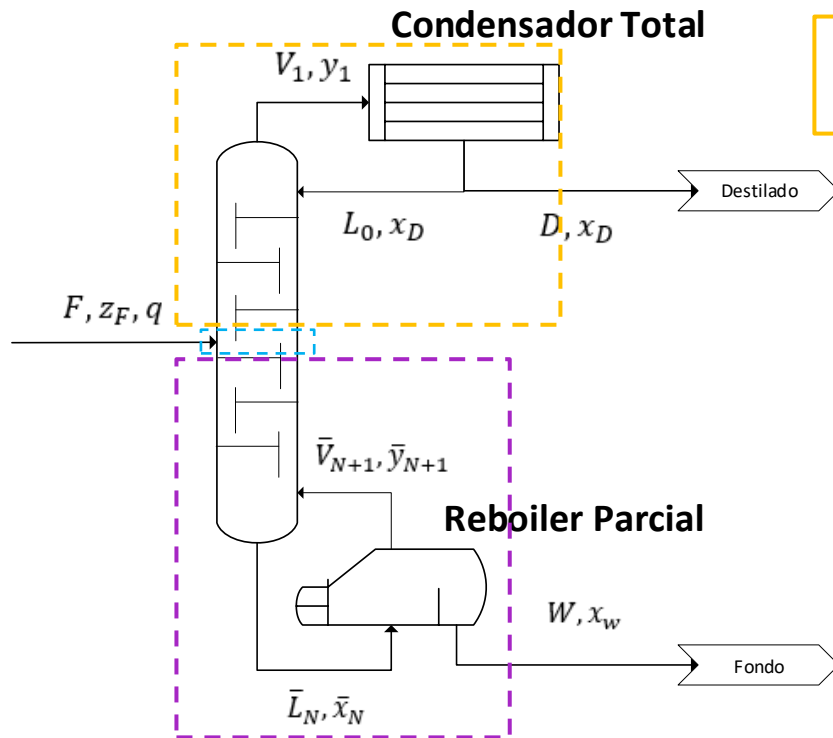
Y obtenemos el valor del reflujo:

$$R = \frac{L_0}{D} = \frac{200 \text{ kmol/h}}{100 \text{ kmol/h}} = 2$$

Resolución ítem a

a. Calcular N° etapas, plato de alimentación, y agua de enfriamiento requerida para $X_W^A < 5\%$.

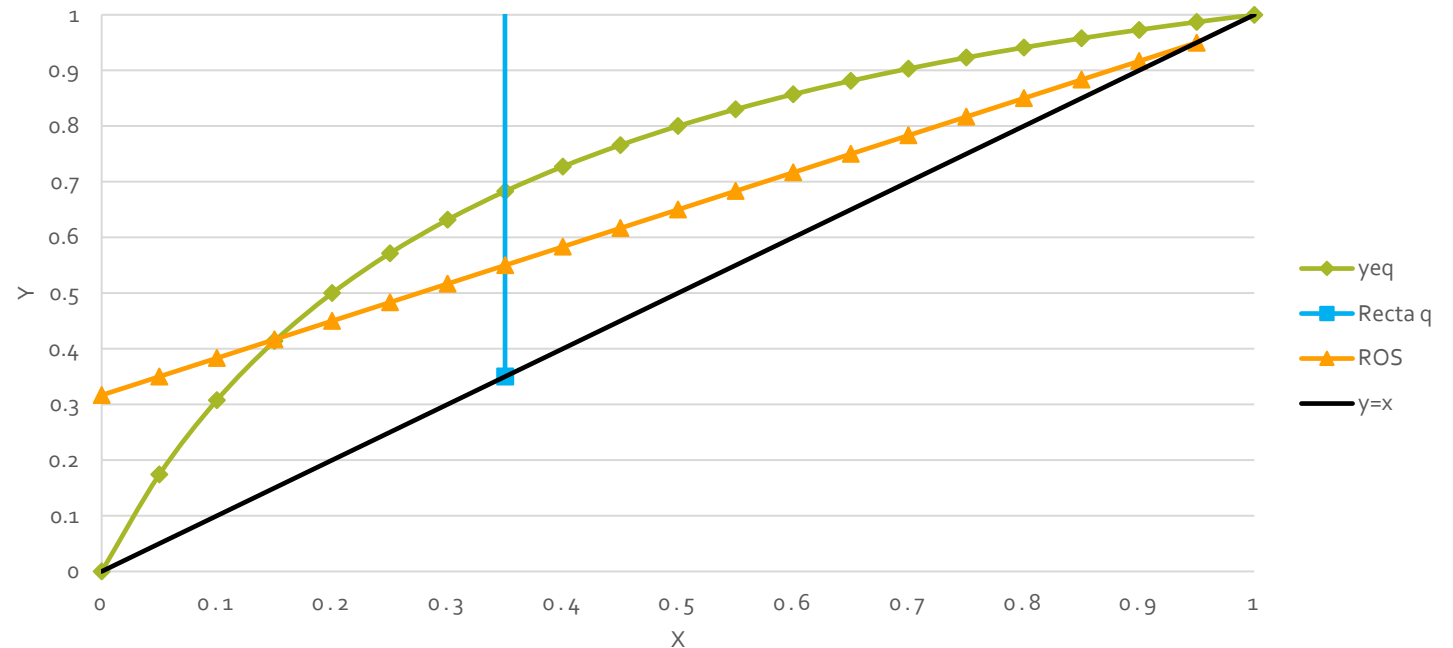
Graficamos lo que tenemos hasta ahora:



$$y_{ROS} = \frac{R}{R+1} \cdot x_{ROS} + \frac{x_D}{R+1}$$

$$y = \frac{z_F}{1-q} - x \cdot \left(\frac{q}{1-q} \right)$$

$$y_A = \frac{\alpha_{A,B} \cdot x_A}{1 + x_A \cdot (\alpha_{A,B} - 1)}$$



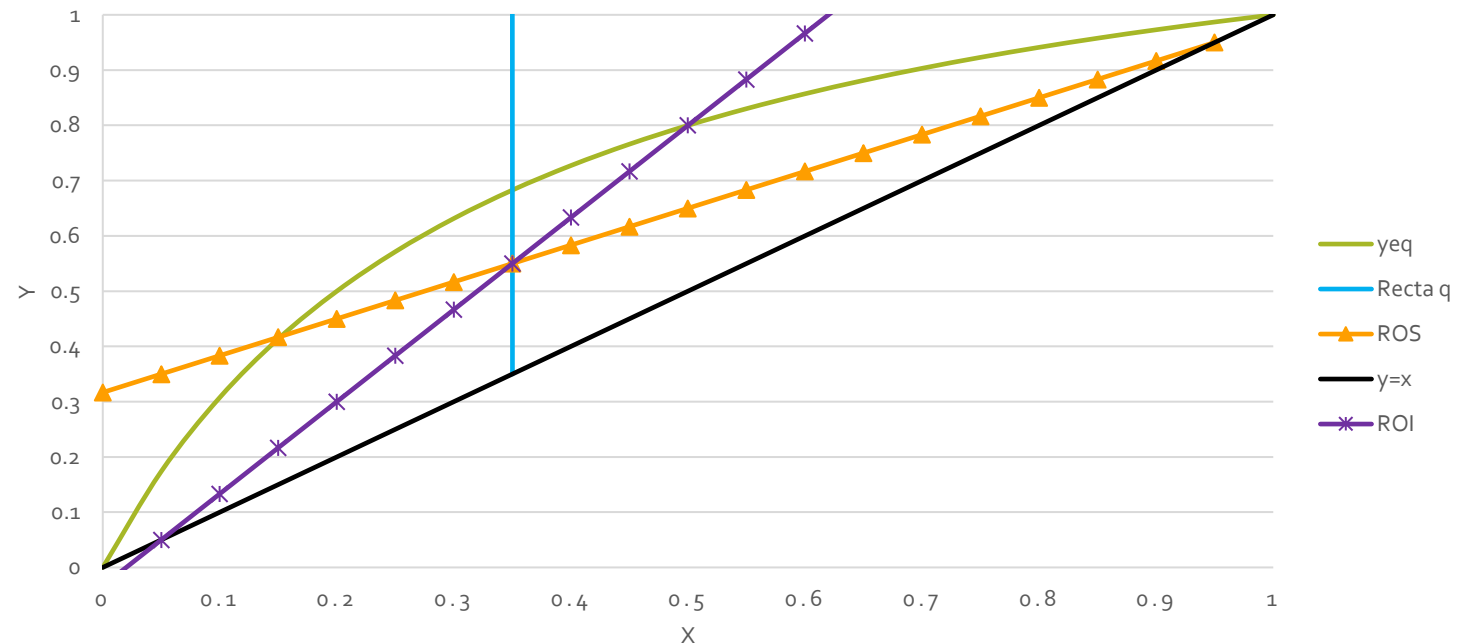
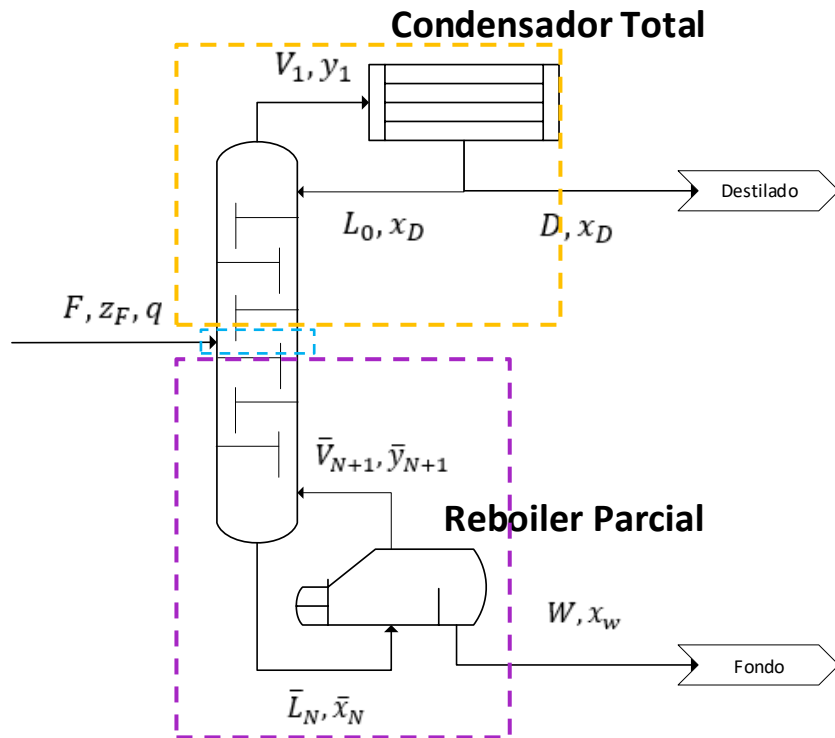
Resolución ítem a

a. Calcular N° etapas, plato de alimentación, y agua de enfriamiento requerida para $X_W^A < 5\%$.

Para obtener la ROI gráficamente utilizaremos la intersección entre la ROS y la recta de alimentación como 1° punto.

El 2° punto lo obtendremos utilizando el dato del fondo (X_W):

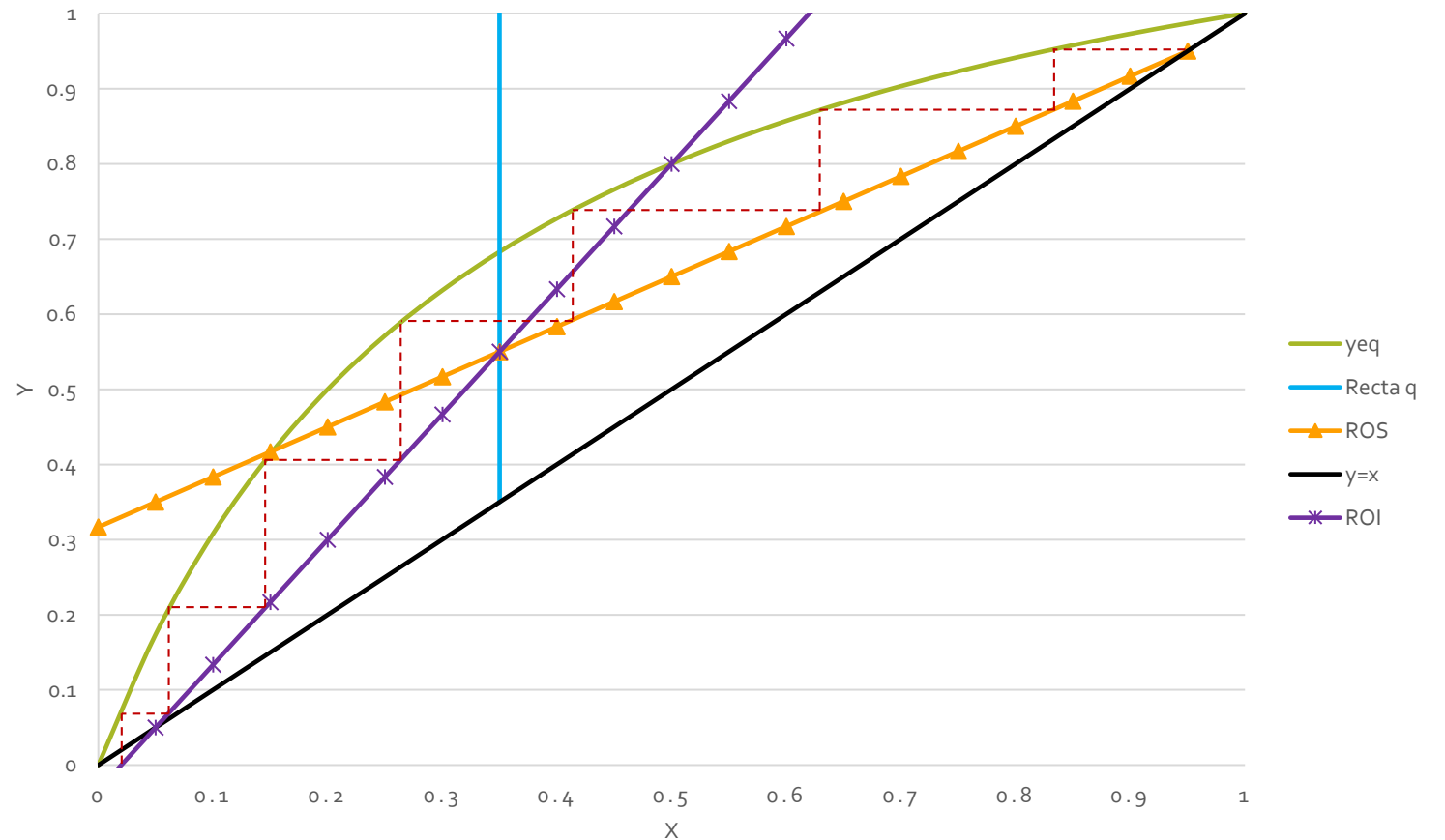
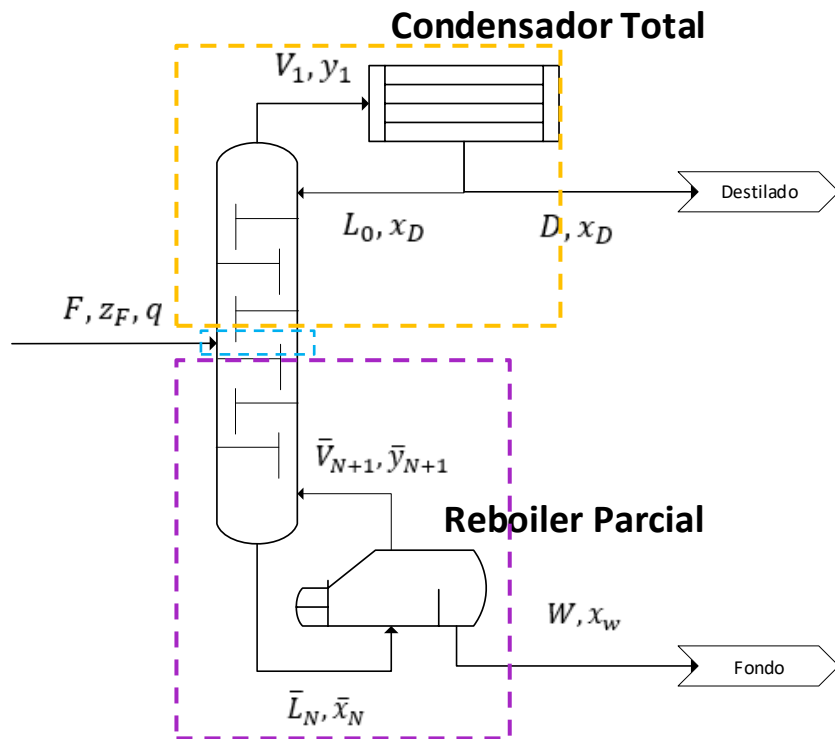
$$y_{ROI} = \frac{\bar{L}}{\bar{V}} \cdot x_W - \frac{W}{\bar{V}} \cdot x_W = \frac{\bar{L} - W}{\bar{V}} \cdot x_W = x_W$$



Resolución ítem a

a. Calcular N° etapas, plato de alimentación, y agua de enfriamiento requerida para $X_W^A < 5\%$.

Ahora sí, tenemos representada toda la operación y podemos contar etapas:



Resolución ítem a

a. Calcular N° etapas, plato de alimentación, y agua de enfriamiento requerida para $X_W^A < 5\%$.

Obtuvimos:

$$N^\circ \text{ etapas} = 7$$

OJO! Como el reboiler es parcial, representa una etapa más de equilibrio.

$$N^\circ \text{ platos} = 6$$

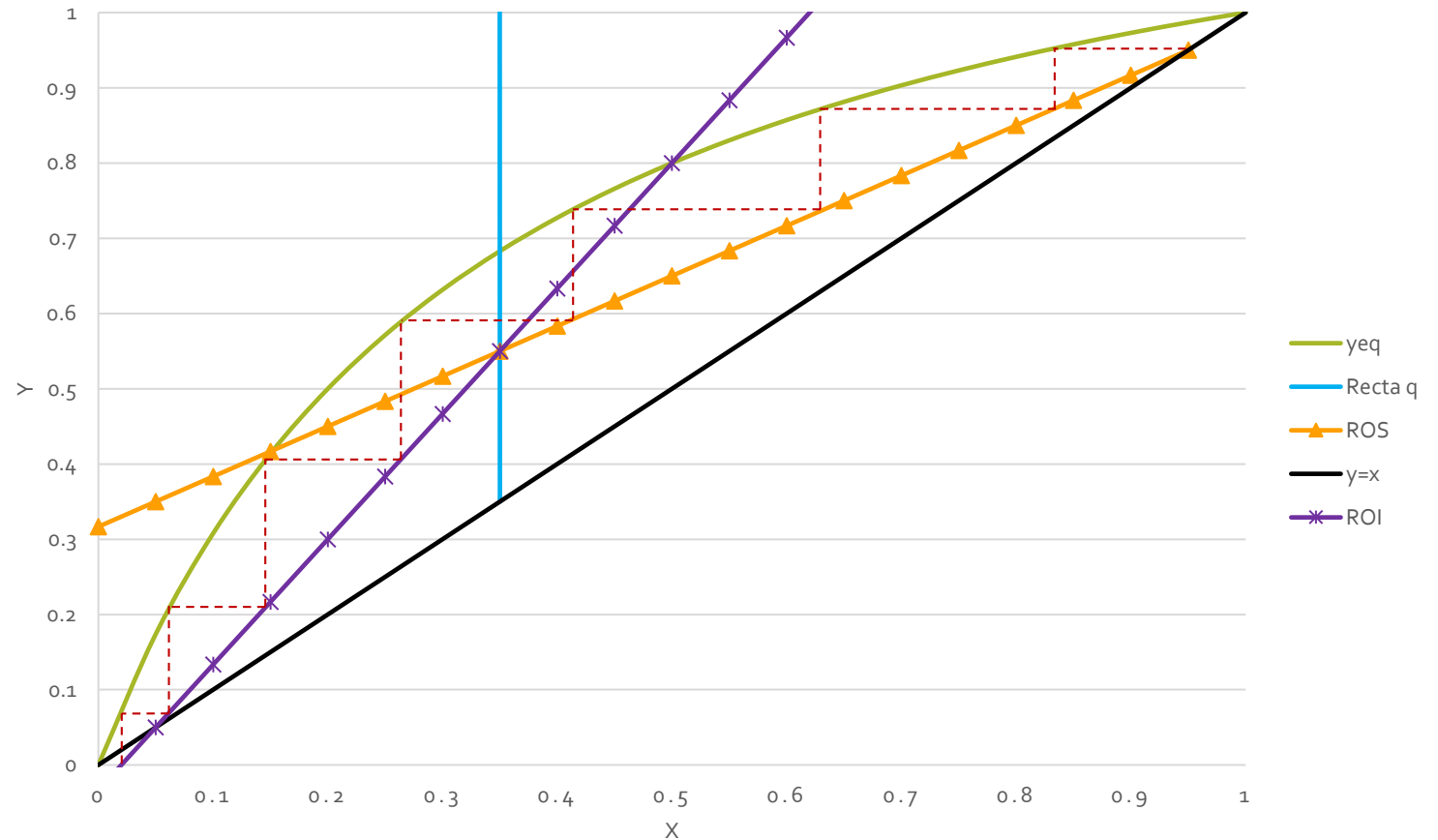
$$\text{Plato de alimentación} = 4$$

Para calcular el agua de enfriamiento:

$$Q_{cond} = m_w \cdot C_{p_w} \cdot \Delta T$$

Asumiendo un ΔT de 10°C :

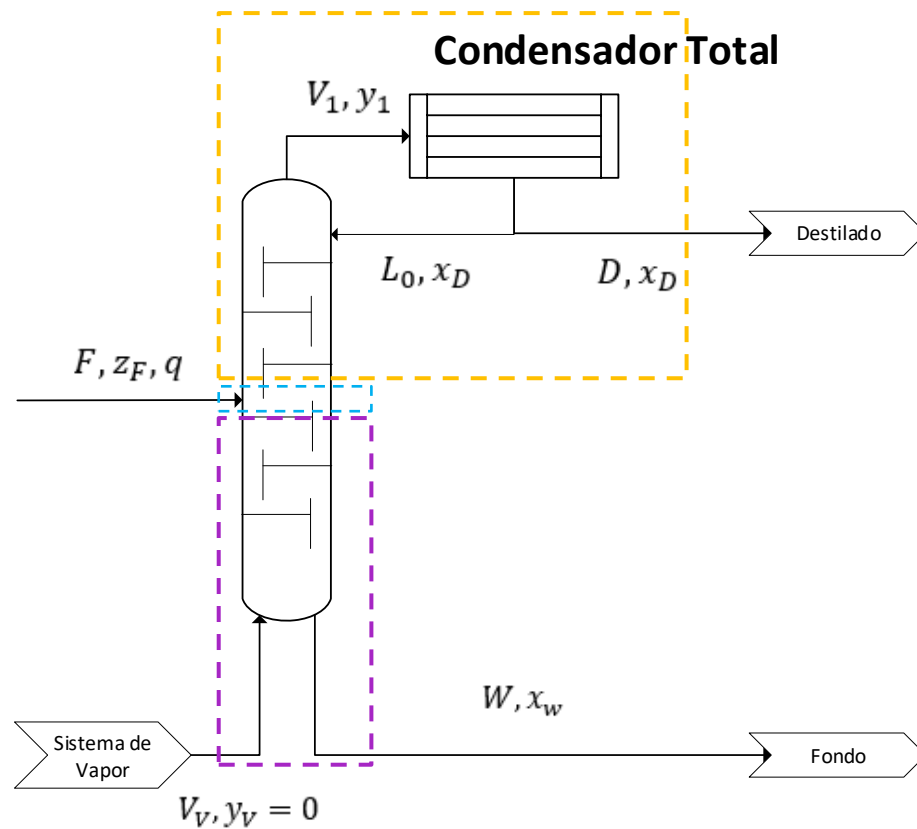
$$m_w = \frac{Q_{cond}}{C_{p_w} \cdot \Delta T} = \frac{120\,000 \text{ kcal/h}}{1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \cdot 10^\circ\text{C}} = 12\,000 \text{ kg/h}$$



Resolución ítem b

b. Reemplazando el reboiler por vapor vivo saturado, con la torre ya construida, manteniendo constantes las condiciones de la alimentación, el destilado y el reflujo operativo ¿cuál es la concentración del producto de fondo?

El esquema de la Torre se modifica:



La zona de rectificación y la alimentación se mantienen iguales:

$$y_{ROS} = \frac{R}{R+1} \cdot x_{ROS} + \frac{x_D}{R+1} \quad y = \frac{z_F}{1-q} - x \cdot \left(\frac{q}{1-q} \right)$$

La zona de agotamiento se modifica:

$$V_V + \bar{L}_{j+1} = \bar{V}_j + W_b)$$

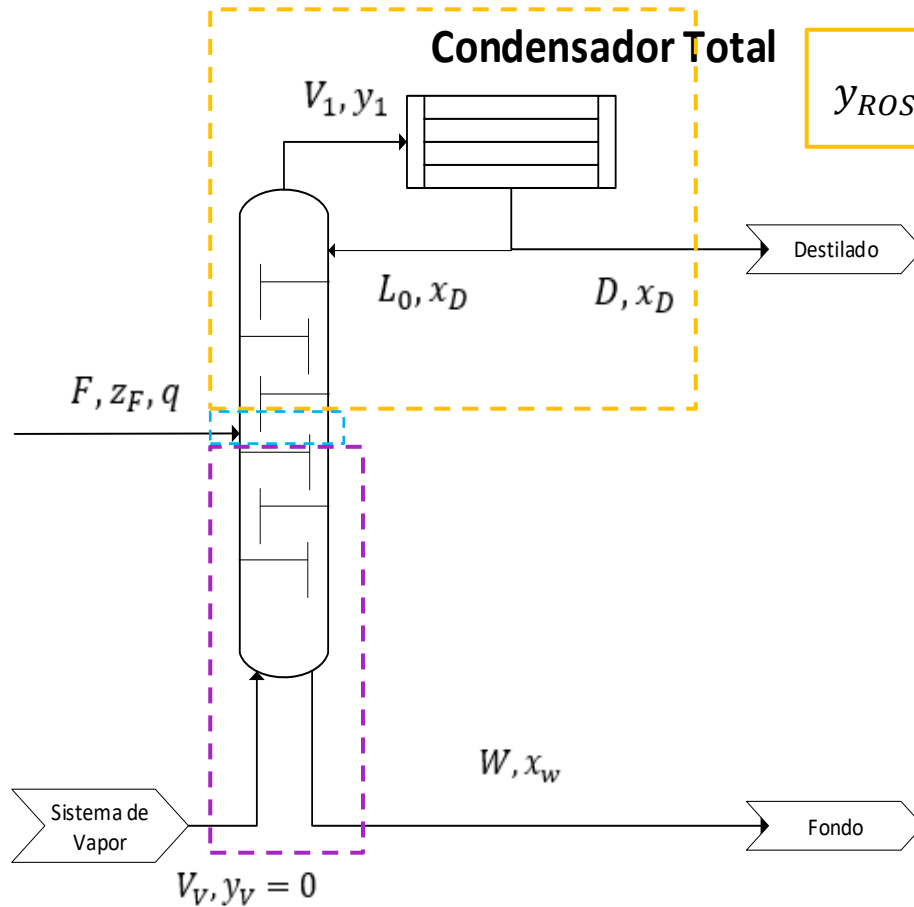
$$V_V \cdot y_V + \bar{L}_{j+1} \cdot x_{j+1} = \bar{V}_j \cdot y_j + W_b) \cdot x_W$$

Despejando: $y = \frac{\bar{L}}{\bar{V}} \cdot x - \frac{W_b)}{\bar{V}} \cdot x_W$ con $\begin{cases} V_V = \bar{V} \\ W_b) = \bar{L} \end{cases}$

$$y_{ROI} = \frac{W_b)}{V_V} \cdot (x - x_w)$$

Resolución ítem b

b. Reemplazando el reboiler por vapor vivo saturado, con la torre ya construida, manteniendo constantes las condiciones de la alimentación, el destilado y el reflujo operativo ¿cuál es la concentración del producto de fondo?



$$y_{ROS} = \frac{R}{R+1} \cdot x_{ROS} + \frac{x_D}{R+1}$$

$$y = \frac{z_F}{1-q} - x \cdot \left(\frac{q}{1-q} \right)$$

$$y_{ROI} = \frac{W_b}{V_V} \cdot (x - x_w)$$

Por enunciado, se mantienen constantes x_D , z_F , F y la torre:

BMG: $V_V + F = D + W_b$

BMP: $\cancel{V_V} \cdot y_V + F \cdot z_F = D \cdot x_D + W_b \cdot x_w$

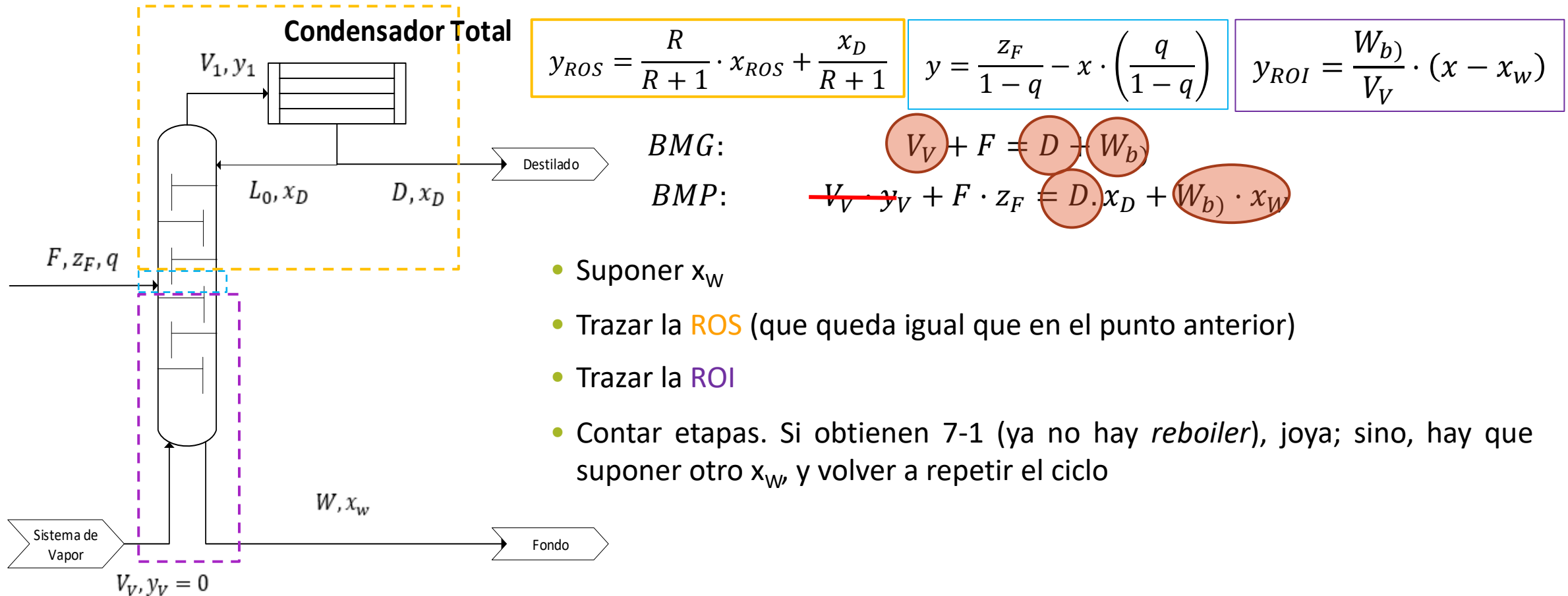
¿Qué dato adicional tengo?

R

Np

Resolución ítem b

b. Reemplazando el reboiler por vapor vivo saturado, con la torre ya construida, manteniendo constantes las condiciones de la alimentación, el destilado y el reflujo operativo ¿cuál es la concentración del producto de fondo?



$$y_{ROS} = \frac{R}{R+1} \cdot x_{ROS} + \frac{x_D}{R+1}$$

$$y = \frac{z_F}{1-q} - x \cdot \left(\frac{q}{1-q} \right)$$

$$y_{ROI} = \frac{W_b}{V_V} \cdot (x - x_w)$$

BMG:

$$V_V + F = D + W_b$$

BMP:

$$V_V \cdot y_V + F \cdot z_F = D \cdot x_D + W_b \cdot x_w$$

- Suponer x_w
- Trazar la ROS (que queda igual que en el punto anterior)
- Trazar la ROI
- Contar etapas. Si obtienen 7-1 (ya no hay reboiler), joya; sino, hay que suponer otro x_w , y volver a repetir el ciclo

Resolución ítem b

b. Reemplazando el reboiler por vapor vivo saturado, con la torre ya construida, manteniendo constantes las condiciones de la alimentación, el destilado y el reflujo operativo ¿cuál es la concentración del producto de fondo?

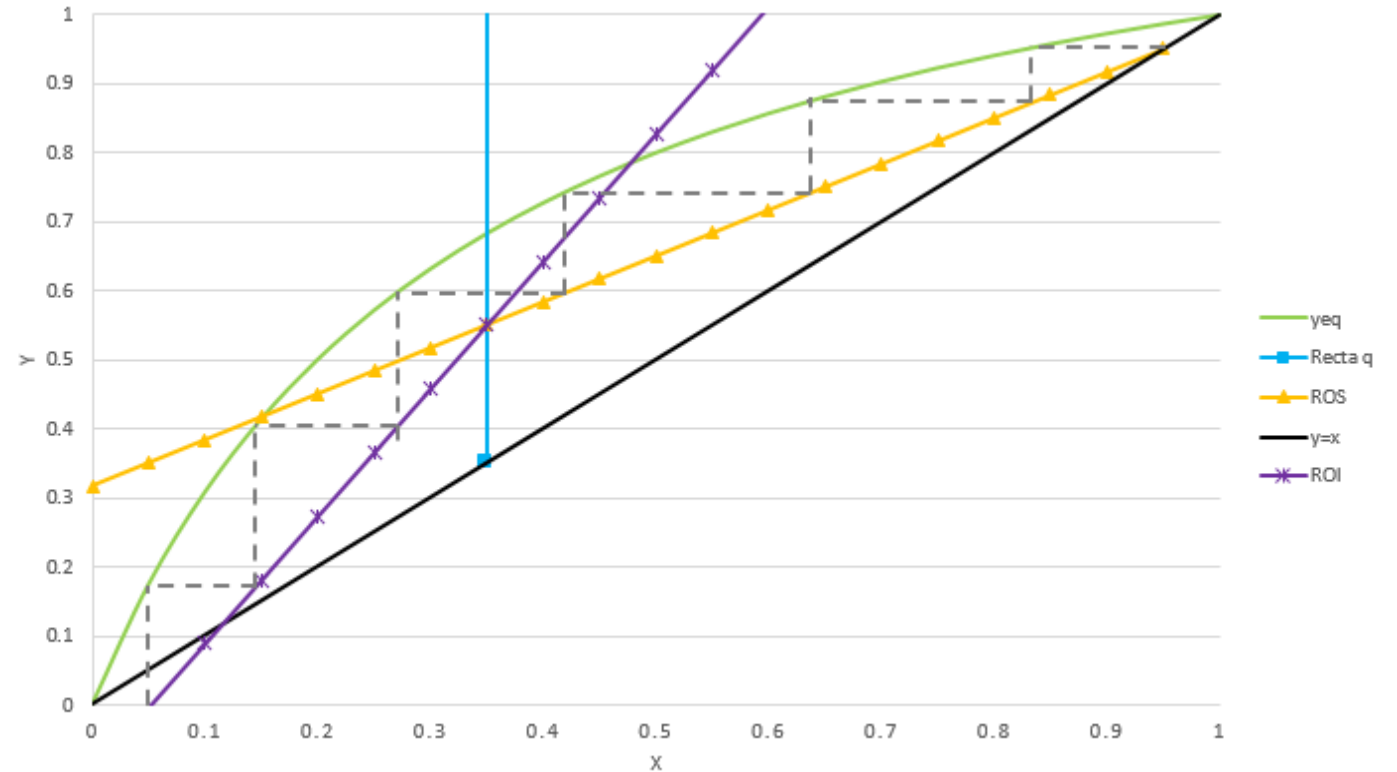
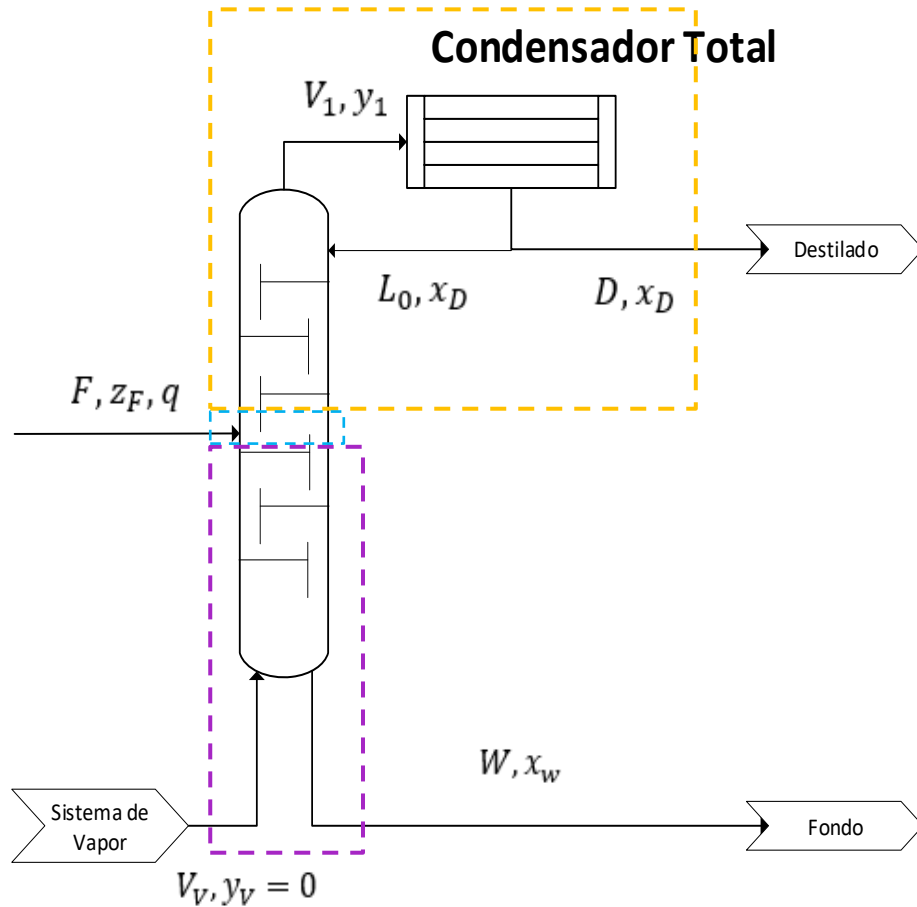


Tabla Comparativa

Parámetro	Ítem a - Reboiler	Ítem b – Vv R constante
F		300
z_F		0,35
q		1
D	100	84,8
x_D		0,95
V	300	254,5
Qcond	12 000	10 178
R	2	2
L₀	200	169,6
W	200	469,6
x_W	0,05	0.052
\bar{L}	500	470
\bar{V}	300	254,5



¿PREGUNTAS?