

Balances de energía en columna de destilación

IIQ2023 - Operaciones Unitarias II

José Rebolledo Oyarce

6 de Abril de 2021



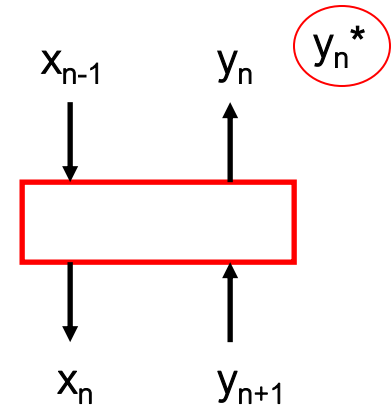
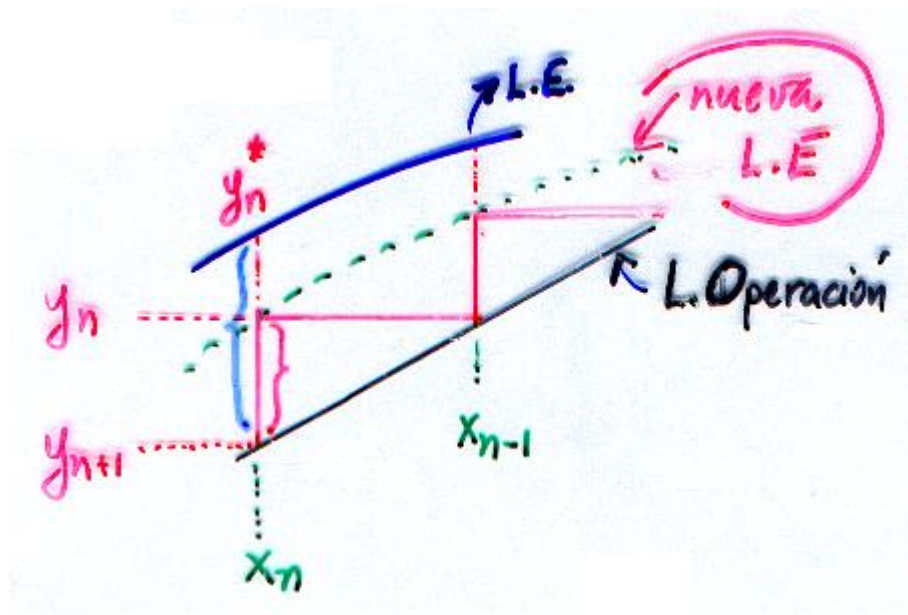
- Recordatorio de Clase Anterior
- Objetivos de la Clase
- Balance de Energía en una Columna de Destilación
 - Diagrama de Entalpía-Composición
 - Regla de la Palanca
 - Balance de Energía en una columna de destilación

Eficiencia Global (para toda la columna):

$$\eta_o = \frac{\# \text{ etapas ideales}}{\# \text{ etapas reales}}$$

Destilación de hidrocarburos $\eta_o \approx 0.5 - 0.85$

Eficiencia de Murphree (desviación de concepto de etapa ideal)

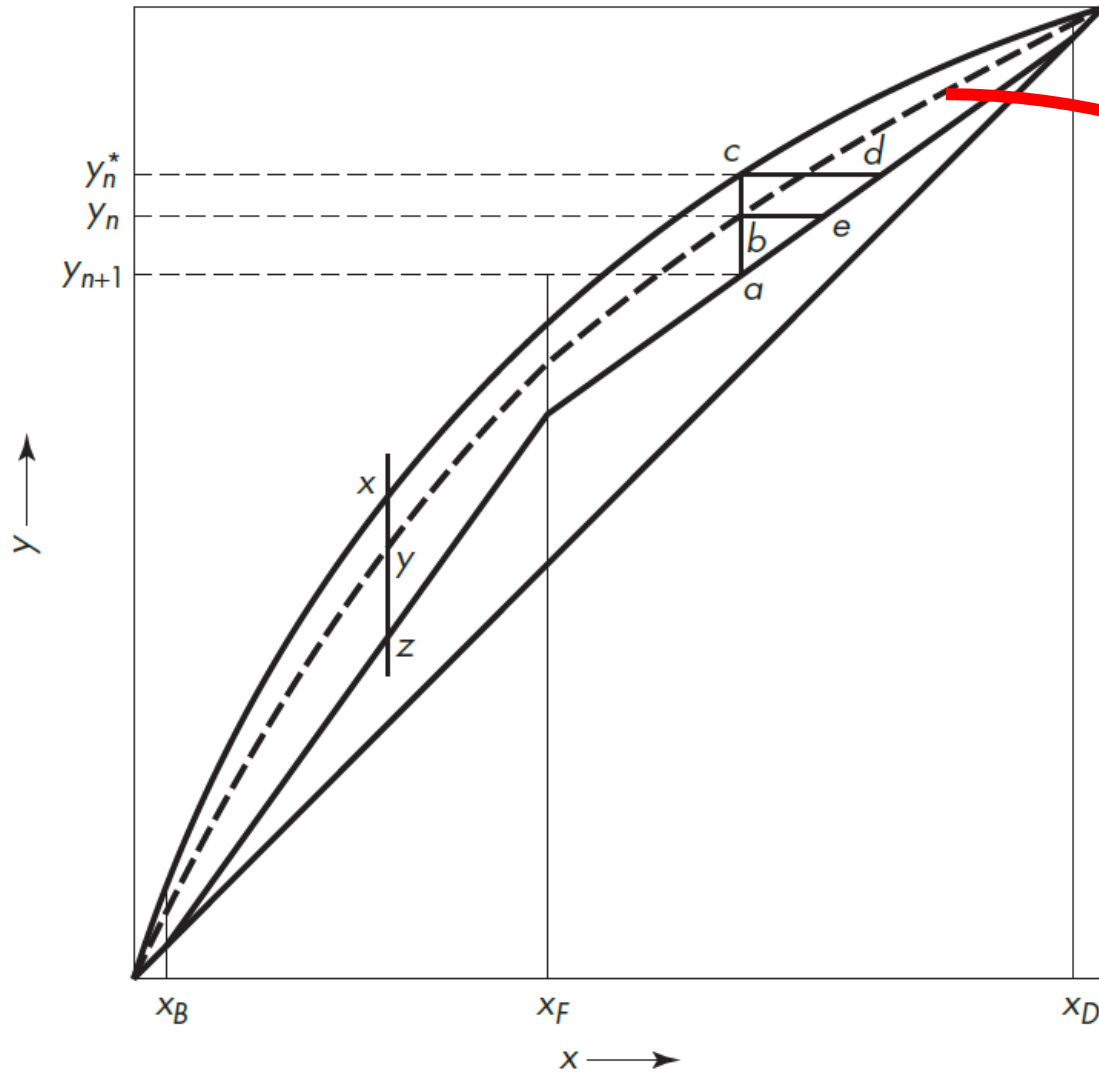


$$\eta_M = \frac{y_n - y_{n+1}}{y_n^* - y_{n+1}}$$

y_n^* : composición del vapor en equilibrio con x_n

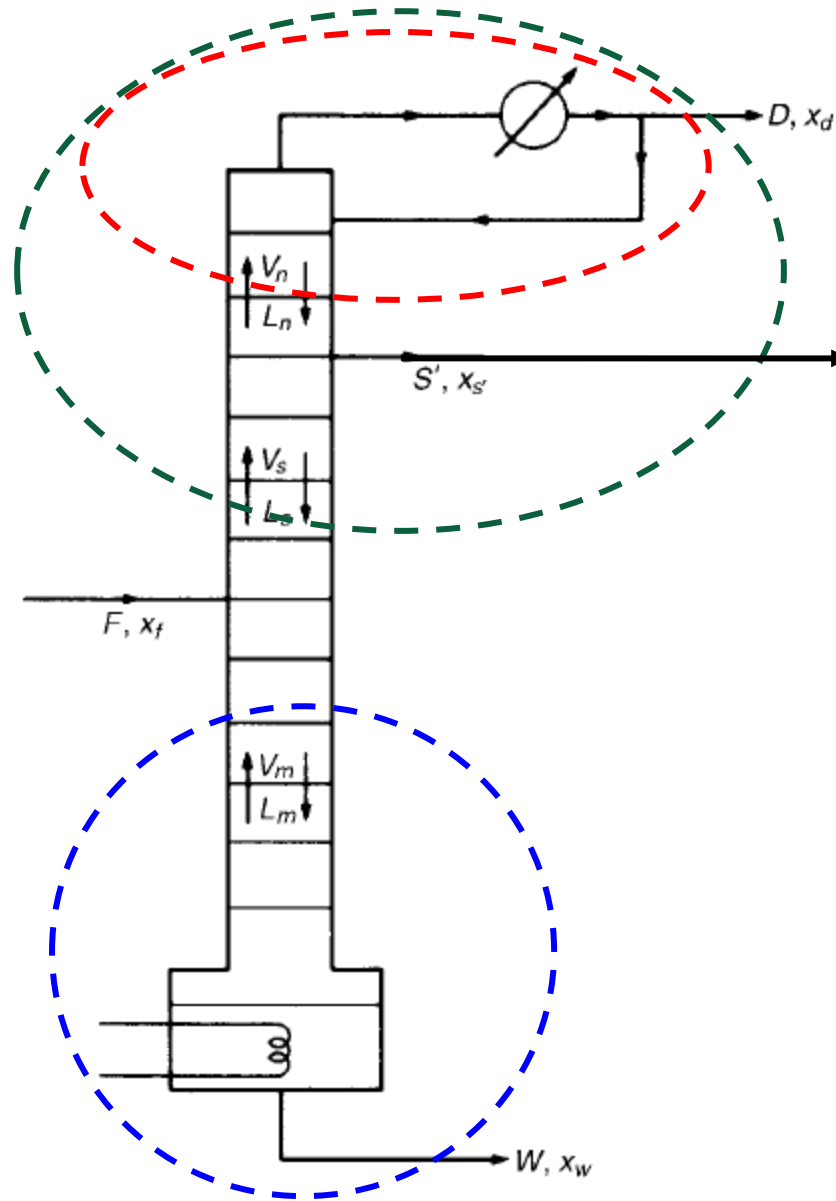
Plato real: en vez de enriquecer desde $y_{n+1} \rightarrow y_n^*$
 $\rightarrow y_n$

Uso de la eficiencia de Murphree

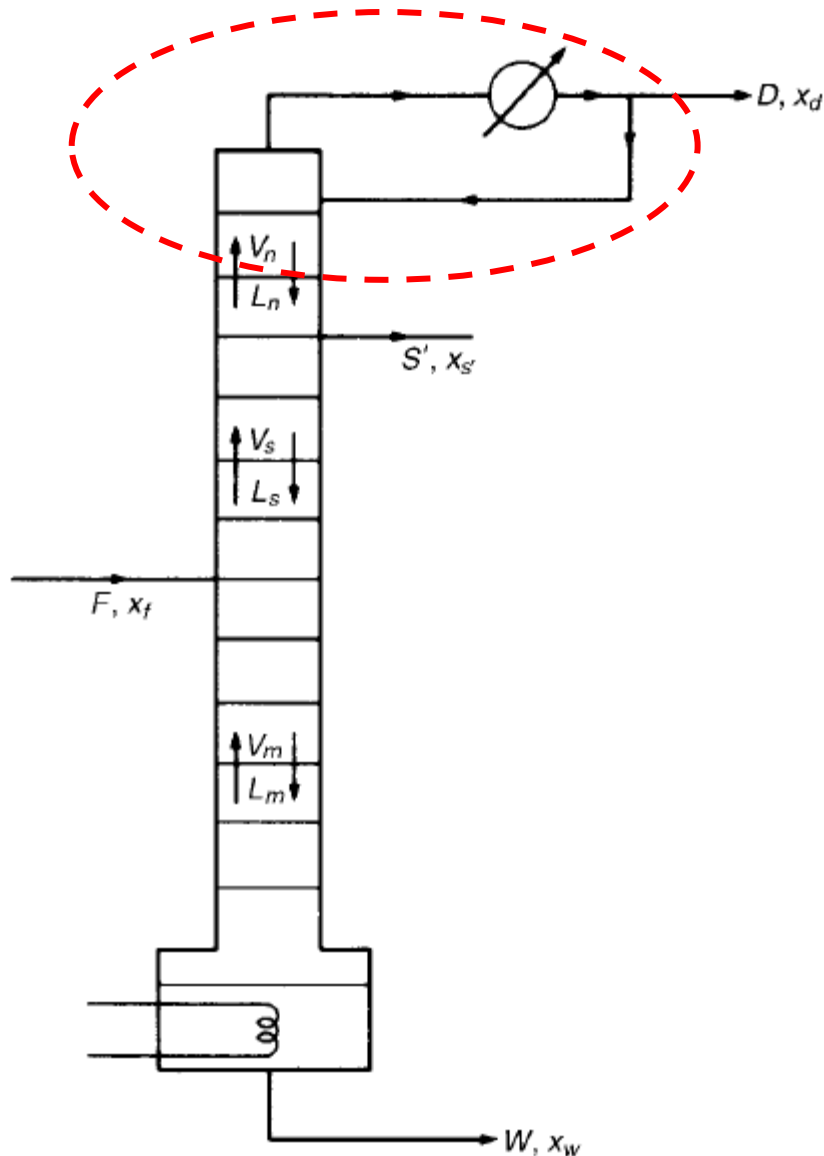


$$y_n = y_{n+1} + \eta_M(y_n^* - y_{n+1})$$

Columna de Destilación Binaria con múltiples salidas



Columna de Destilación Binaria con múltiples salidas



Balance de materia en la envolvente superior:

$$V_{n+1} = L_n + D$$

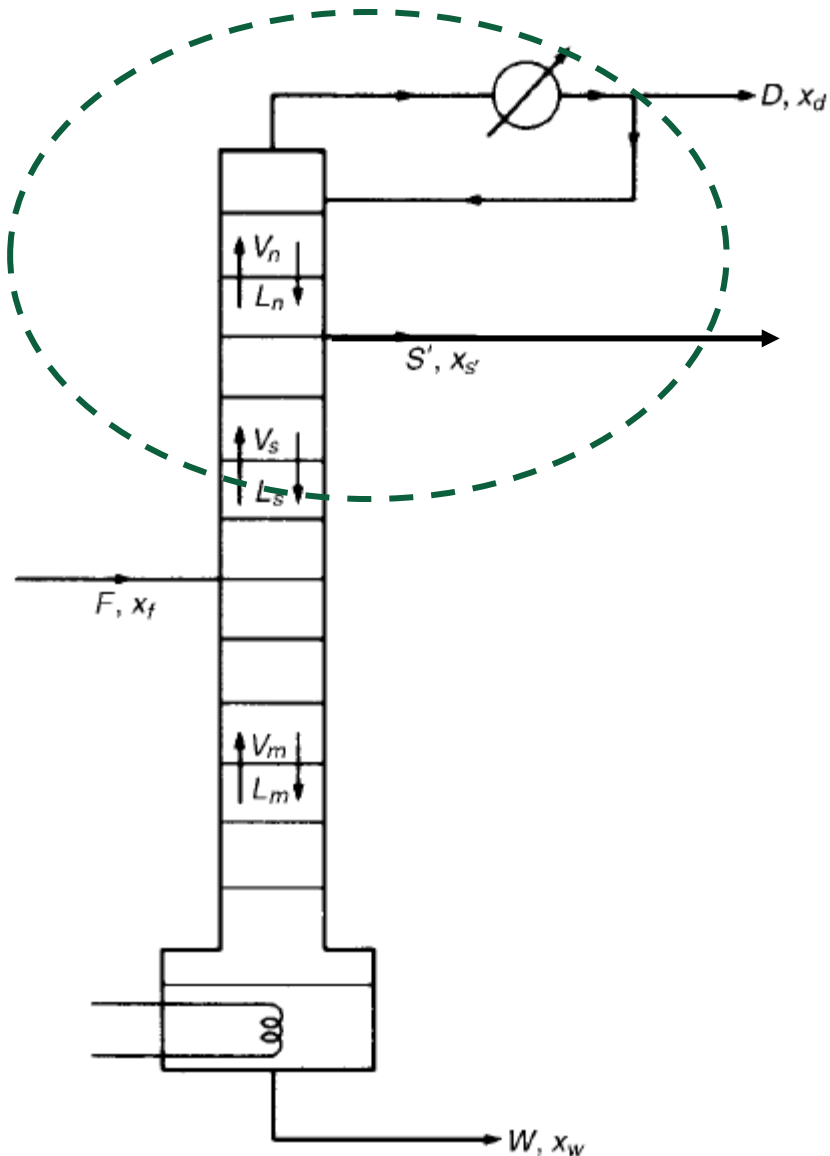
$$V_{n+1}y_{n+1} = L_nx_n + Dx_D$$

$$y_{n+1} = \frac{L_n}{V_{n+1}}x_n + \frac{D}{V_{n+1}}x_D$$

Y con el supuesto de Flujos molares constantes:

$$y_{n+1} = \frac{L}{V}x_n + \frac{D}{V}x_D$$

Columna de Destilación Binaria con múltiples salidas



Balance de materia en la envolvente intermedia:

$$V_{s+1} = L_s + S' + D$$

$$V_{s+1}y_{s+1} = L_sx_s + S'x'_s + Dx_D$$

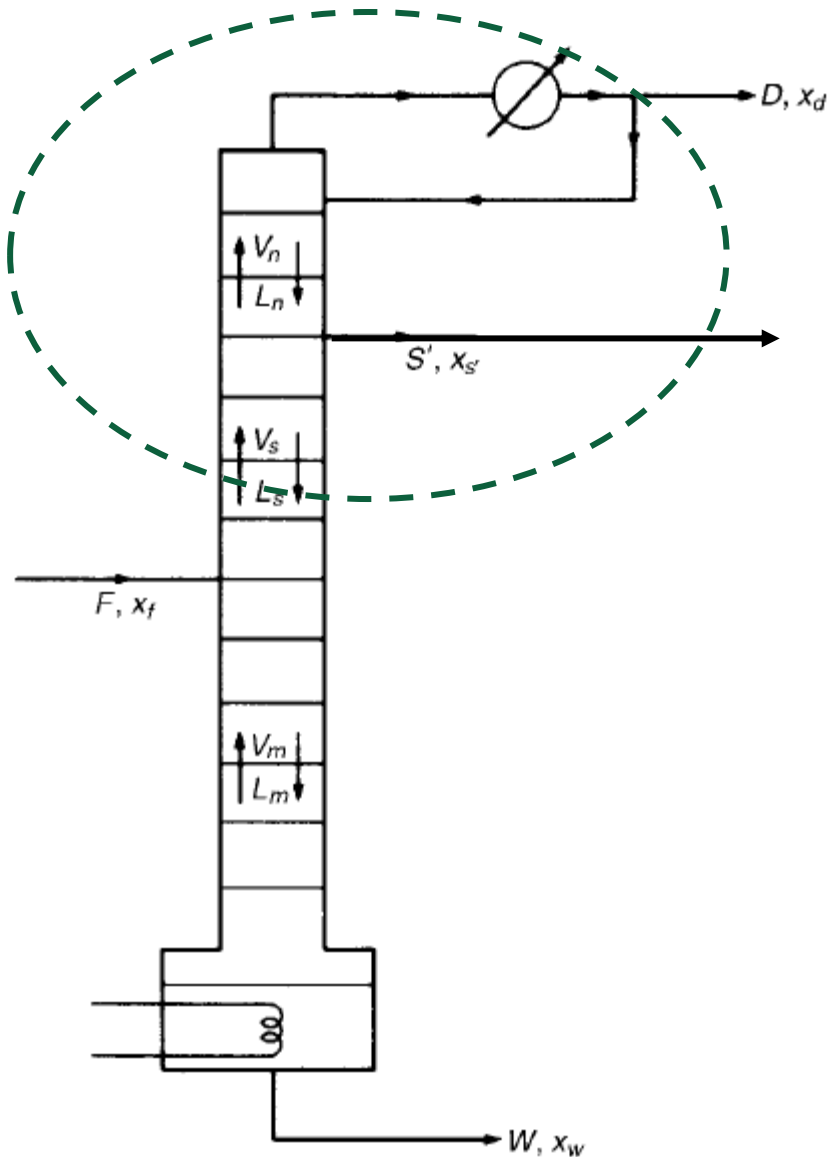
$$y_{s+1} = \frac{L_s}{V_{s+1}}x_n + \frac{S'x'_s + Dx_D}{V_{s+1}}$$

Pero tenemos que S' es liquido y no pasa por ningún otro proceso, por lo que:

$$L_s = L_n - S'$$

$$V_{s+1} = V_n$$

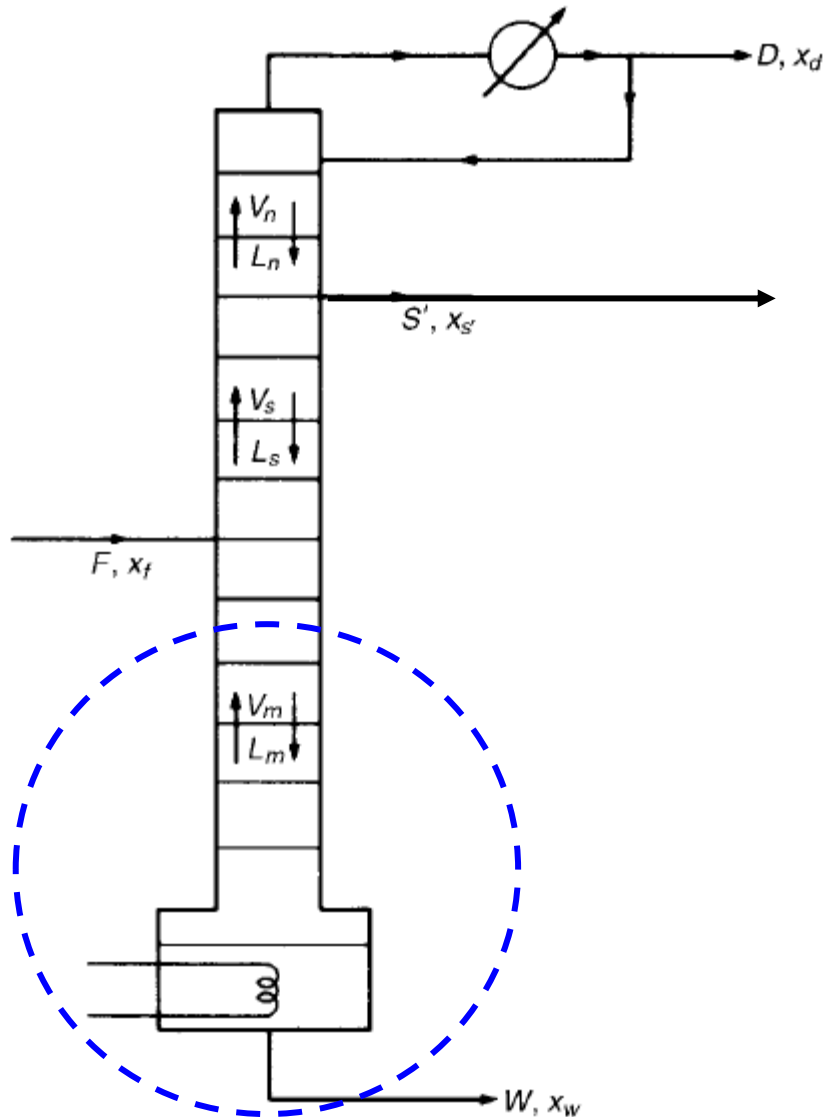
Columna de Destilación Binaria con múltiples salidas



Considerando el supuesto de flujos molares constantes:

$$y_{s+1} = \frac{L - S'}{V} x_n + \frac{S'x'_s + Dx_D}{V}$$

Columna de Destilación Binaria con múltiples salidas



Balance de materia en la envolvente inferior:

$$L_{m-1} = V_m + B$$

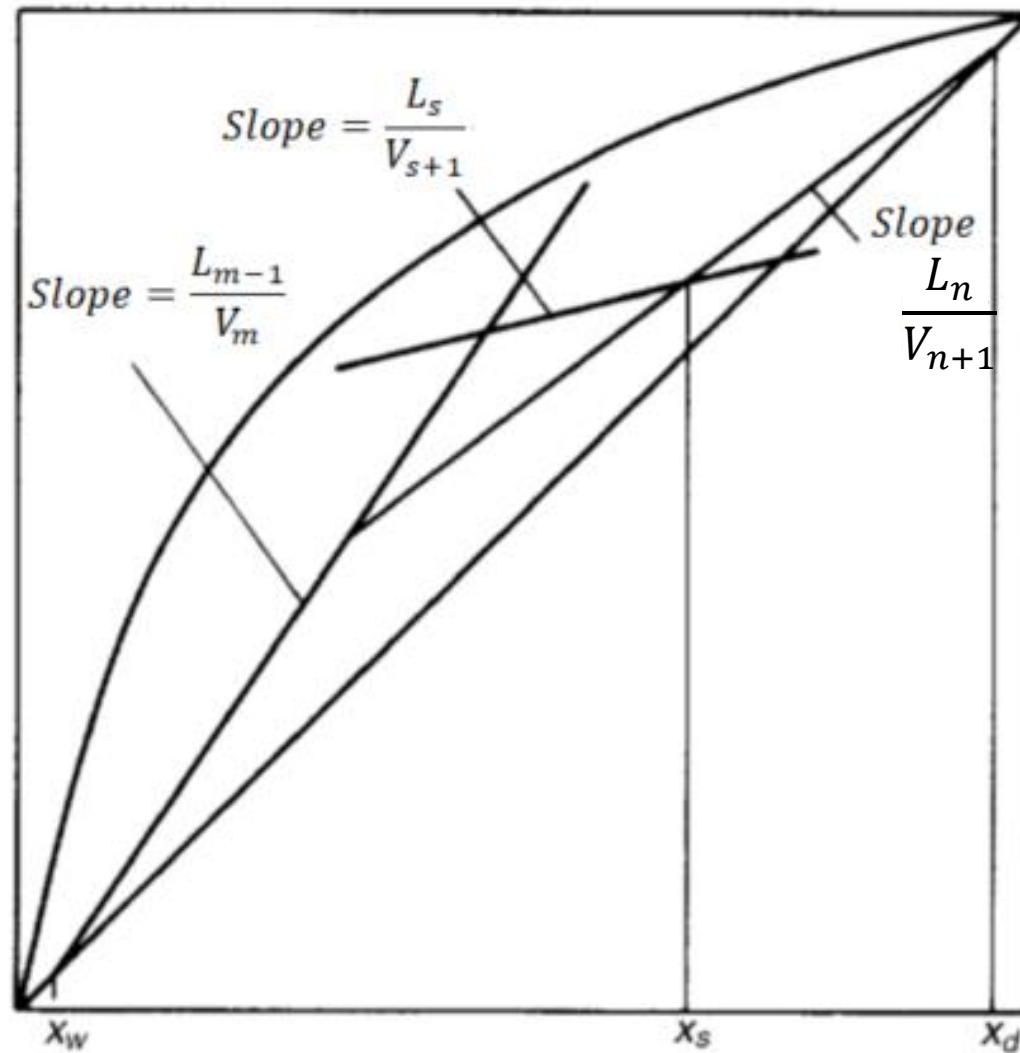
$$L_{m-1}x_{m-1} = V_my_m + Bx_B$$

$$y_m = \frac{L_{m-1}}{V_m}x_{m-1} - \frac{B}{V_m}x_B$$

Y con el supuesto de Flujos molares constantes:

$$y_{n+1} = \frac{\bar{L}}{\bar{V}}x_{m-1} - \frac{B}{\bar{V}}x_B$$

Columna de Destilación Binaria con múltiples salidas



Objetivos de la Clase

- Comprender el diagrama de entalpía-composición en una mezcla líquida-vapor
- Comprender el balance general de energía en una columna de destilación
- Aprender a localizar corrientes relevantes en la destilación en un gráfico entalpía-composición, y su utilidad.

¿Problema del Método de McCabe y Thiele?

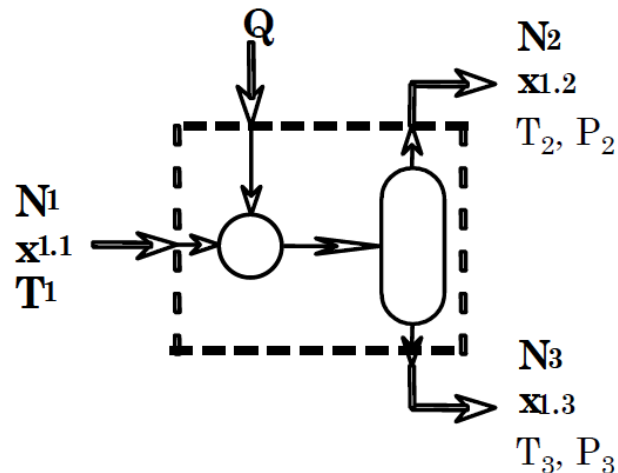
Supuestos del Método de McCabe-Thiele:

- Calores latentes de mezcla binaria son aproximadamente iguales.
- Los términos de calor sensible son constantes y además son despreciables frente a los términos de calor latente.

En McCabe se considera un derrame molar constante en cada sección de la torre de destilación.

¿Qué pasa si levantamos el supuesto de flujos molares constantes, por lo que requeriremos efectuar balances de energía (entalpía)?

Volviendo al destilador flash



Balance General de Materia:

$$N_1 = N_2 + N_3$$

Balance de Energía, utilizando T_r líquido como referencia:

$$N_1 \Delta H_1(T_r) + Q = N_2 \Delta H_2(T_r) + N_3 \Delta H_3(T_r)$$

$$\begin{aligned} & N_1 \left(x_{A,1} \Delta H_{A,1}(T_r) + x_{B,1} \Delta H_{B,1}(T_r) \right) + Q \\ &= N_2 \left(x_{A,2} \Delta H_{A,2}(T_r) + x_{B,2} \Delta H_{B,2}(T_r) \right) + N_3 \left(x_{A,3} \Delta H_{A,3}(T_r) + x_{B,3} \Delta H_{B,3}(T_r) \right) \end{aligned}$$

Construcción del Diagrama de Entalpía-Composición

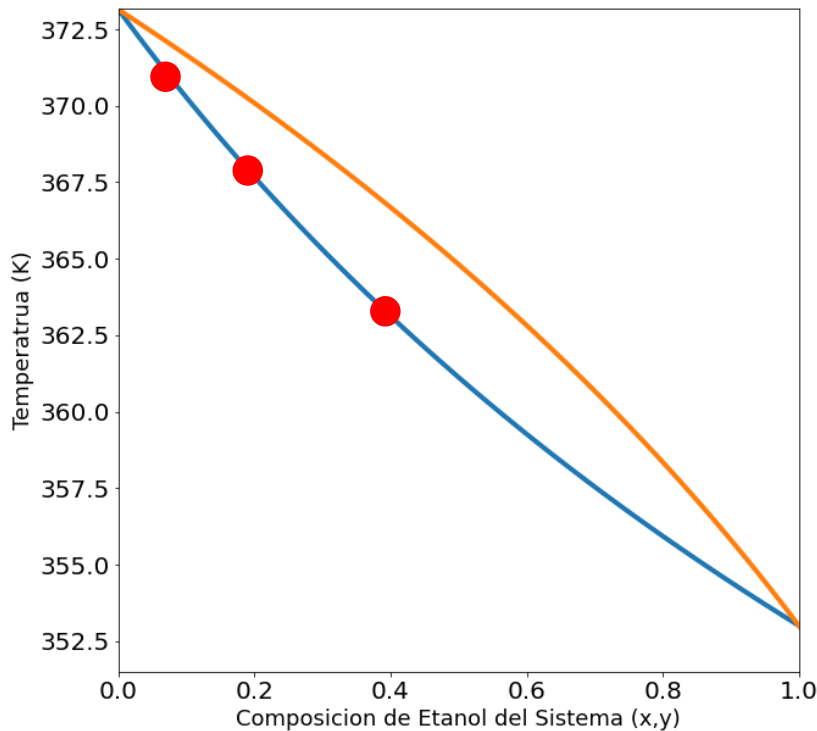
El término $\Delta H_3(T_r)$ hace referencia a la diferencia de entalpía que tiene la corriente de líquido del destilador con respecto a la temperatura de referencia T_r . Con ello, el término para una mezcla binaria es:

$$\Delta H_3(T_r) = x_{A,3} \int_{T_r}^T (c_{pL})_A dT + x_{B,3} \int_{T_r}^T (c_{pL})_B dT$$

Donde T es la temperatura de la corriente líquida que sale de la columna.

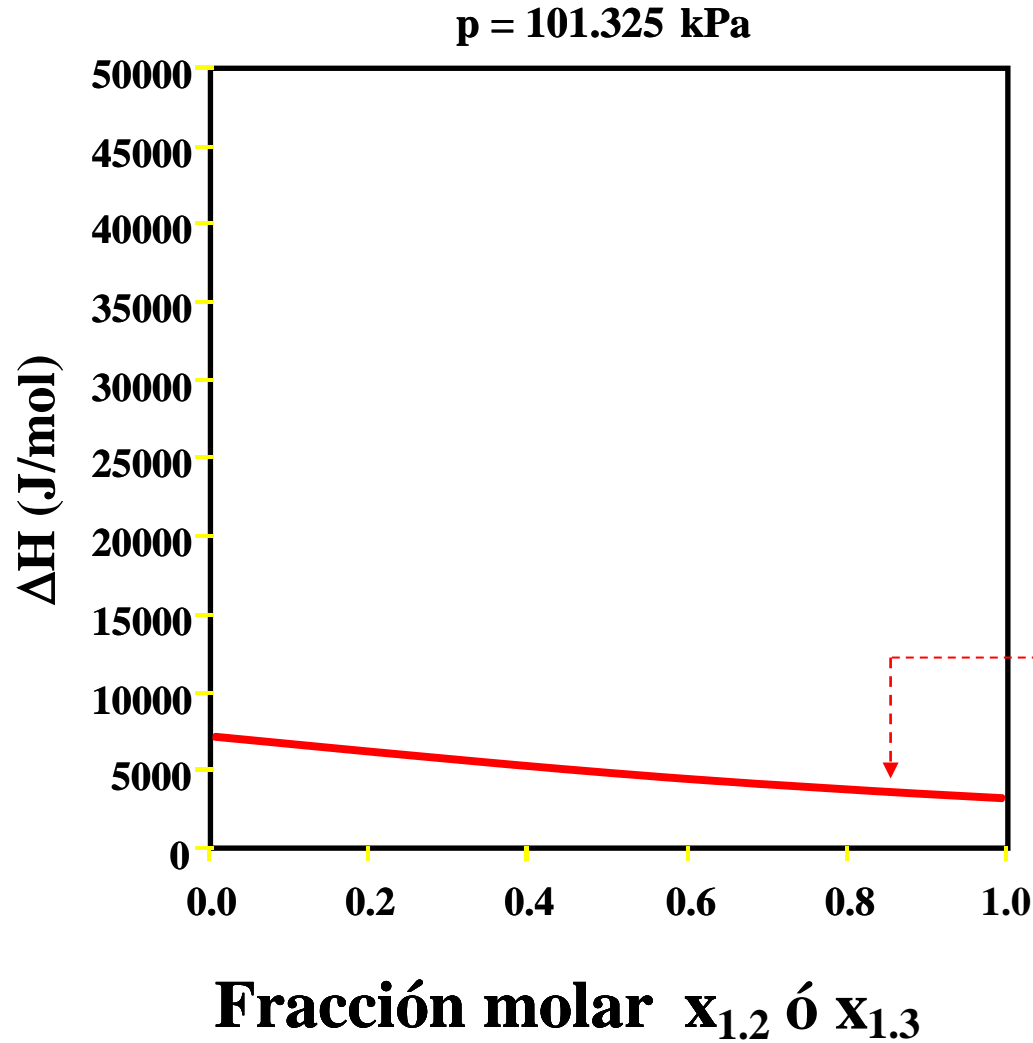
Construcción del Diagrama de Entalpía-Composición

Con la ecuación anterior podemos construir un diagrama que relaciona $\Delta H_3(T_r)$ con la fracción $x_{A,3}$ (mezcla ideal)



| $x_{A,3}$ | T (K) | $\Delta H_3(T_r)$ |
|-----------|---------------------------|---|
| 0.0 | $T_{\text{ebullición,B}}$ | $x_{A,3} \int_{T_r}^T (c_{pL})_A dT + x_{B,3} \int_{T_r}^T (c_{pL})_B dT$ |
| 0.2 | | $x_{A,3} \int_{T_r}^T (c_{pL})_A dT + x_{B,3} \int_{T_r}^T (c_{pL})_B dT$ |
| . | . | . |
| . | . | . |
| . | . | . |
| 1.0 | $T_{\text{ebullición,A}}$ | $x_{A,3} \int_{T_r}^T (c_{pL})_A dT + x_{B,3} \int_{T_r}^T (c_{pL})_B dT$ |

Construcción del Diagrama Entalpía-Composición (Estado de Referencia, ej: T_r °C, líquido)



$$\Delta H_3(T_r)$$
$$x_{A,3} \int_{T_r}^T (c_{pL})_A dT + x_{B,3} \int_{T_r}^T (c_{pL})_B dT$$

Construcción del Diagrama de Entalpía-Composición

El término $\Delta H_2(T_r)$ hace referencia a la diferencia de entalpía que tiene la corriente de vapor del destilador con respecto a la temperatura de referencia T_r . Con ello, el término para una mezcla binaria es:

$$\Delta H_2(T_r) = x_{A,2}\Delta H_{A,2} + x_{B,2}\Delta H_{B,2}$$

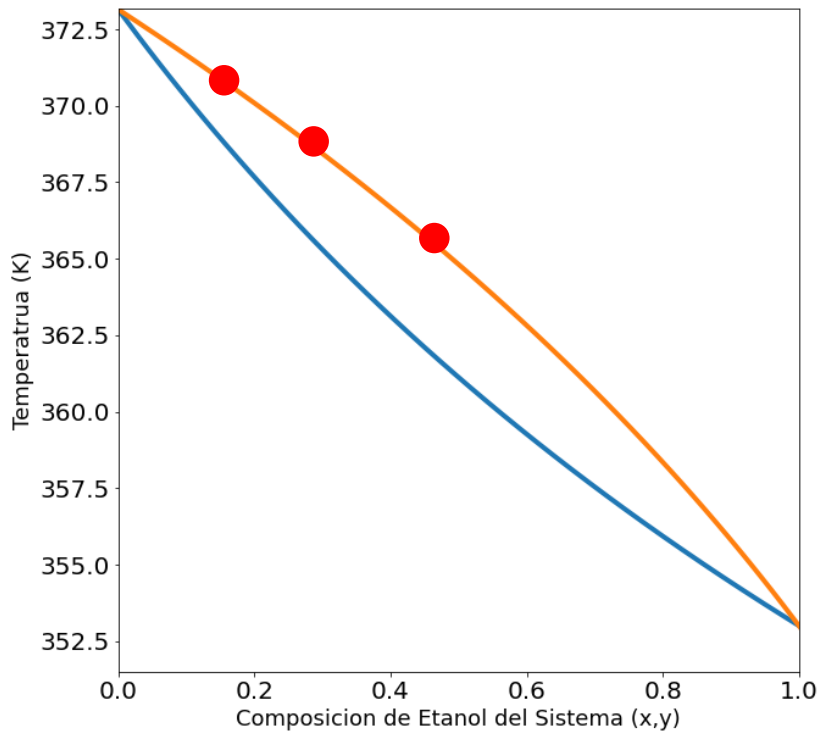
donde:

$$\Delta H_{i,2}(T_r) = \int_{T_r}^T (c_{pL})_i dT + (\Delta H_{LV})_i(T)$$

$$\Delta H_{i,2}(T_r) = \int_{T_r}^{T_{ebullicion,i}} (c_{pL})_i dT + (\Delta H_{LV})^o_i + \int_{T_{ebullicion,i}}^T (c_{pg})_i dT$$

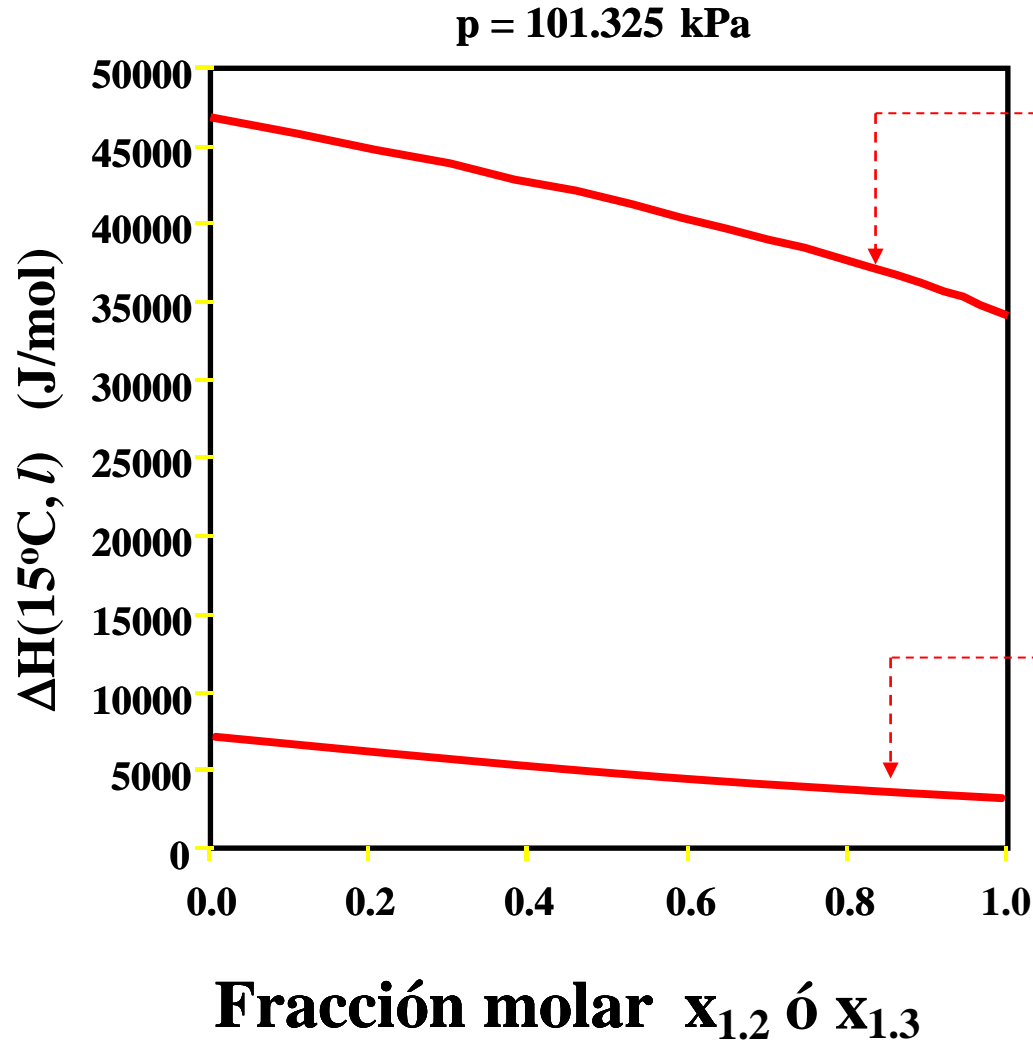
Construcción del Diagrama de Entalpía-Composición

Con la ecuación anterior podemos construir un diagrama que relaciona $\Delta H_3(T_r)$ con la fracción $x_{A,3}$ (mezcla ideal)



| $x_{A,2}$ | T (K) | $\Delta H_2(T_r)$ |
|-----------|---------------------------|---|
| 0.0 | $T_{\text{ebullición,B}}$ | $x_{A,2}\Delta H_{A,2} + x_{B,2}\Delta H_{B,2}$ |
| 0.2 | | $x_{A,2}\Delta H_{A,2} + x_{B,2}\Delta H_{B,2}$ |
| . | . | . |
| . | . | . |
| . | . | . |
| 1.0 | $T_{\text{ebullición,A}}$ | $x_{A,2}\Delta H_{A,2} + x_{B,2}\Delta H_{B,2}$ |

Construcción del Diagrama Entalpía-Composición (Estado de Referencia, ej: T_r °C, líquido)



$$\Delta H_2(T_r)$$

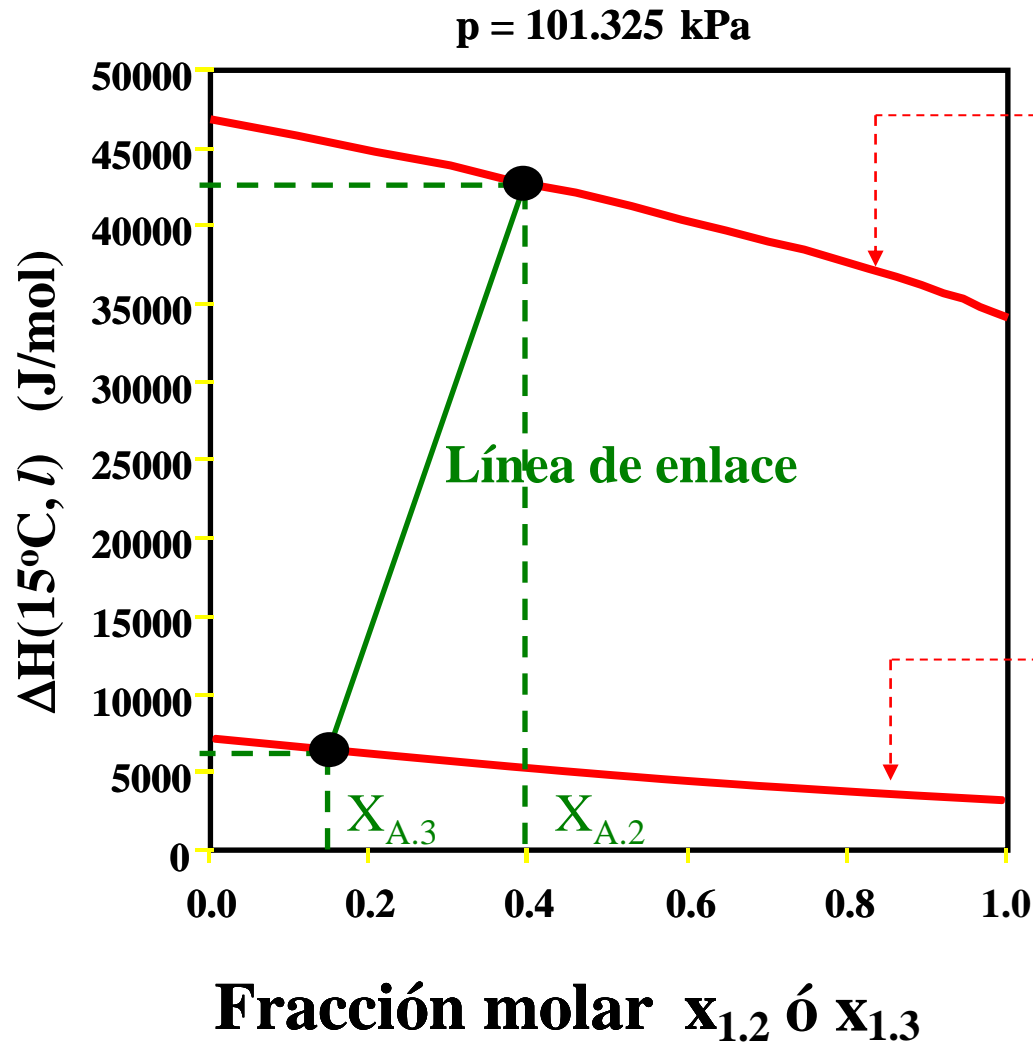
$$x_{A,2}\Delta H_{A,2} + x_{B,2}\Delta H_{B,2}$$

$$H_{i,2}(T_r) = \int_{T_r}^T (c_{pL})_i dT + (\Delta H_{LV})_i(T)$$

$$\Delta H_3(T_r)$$

$$x_{A,3} \int_{T_r}^T (c_{pL})_A dT + x_{B,3} \int_{T_r}^T (c_{pL})_B dT$$

Construcción del Diagrama Entalpía-Composición (Estado de Referencia, ej: T_r °C, líquido)



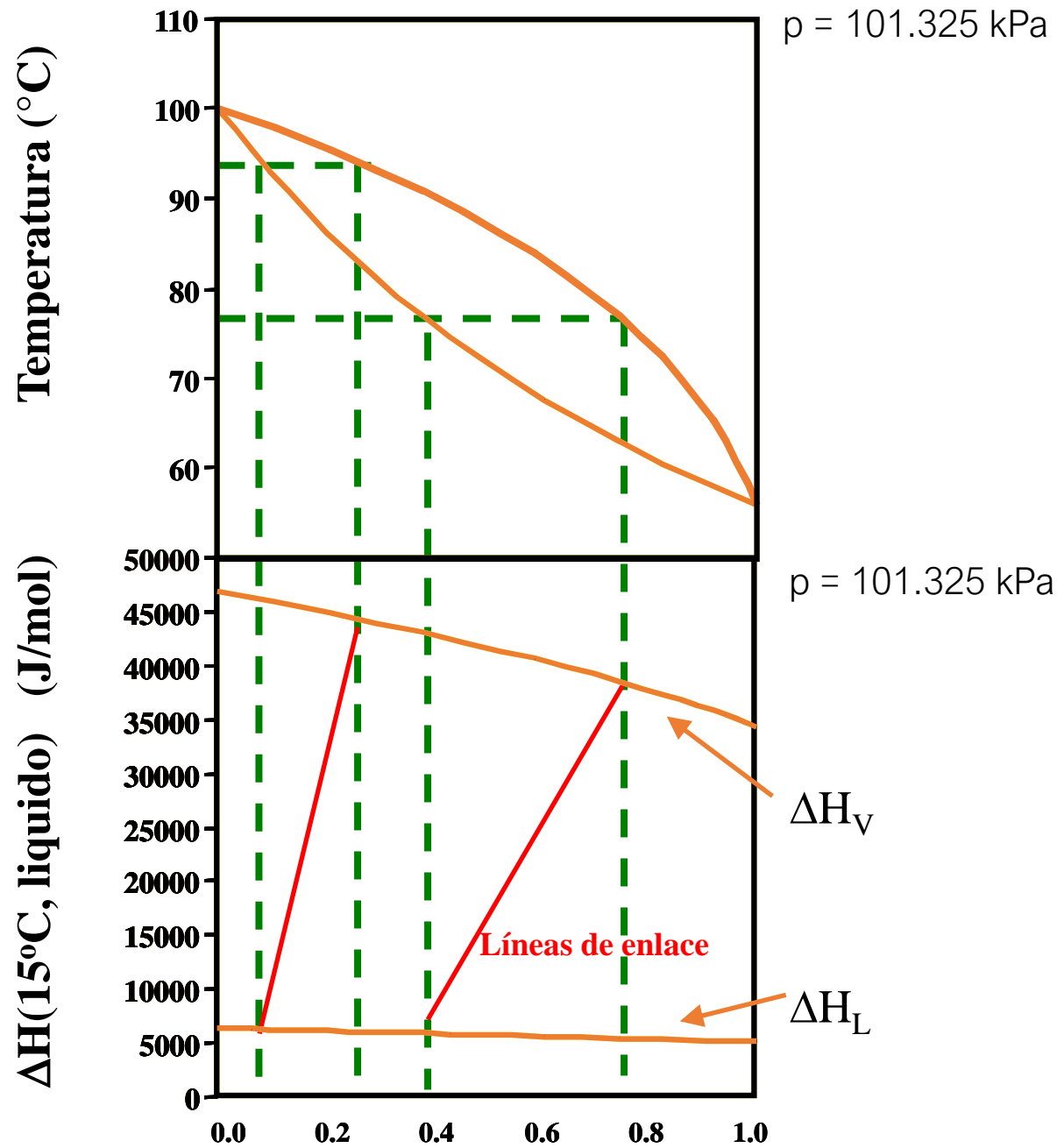
$$\Delta H_2(T_r)$$

$$x_{A,2}\Delta H_{A,2} + x_{B,2}\Delta H_{B,2}$$

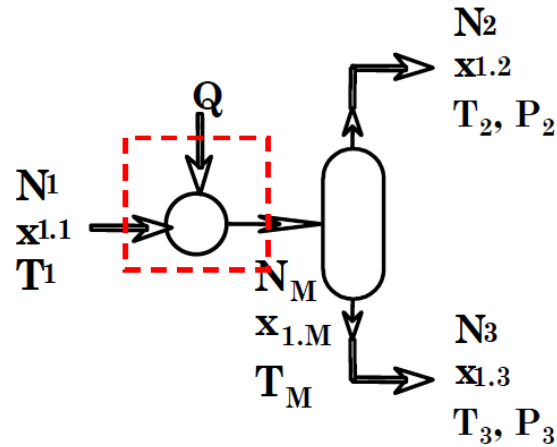
$$H_{i,2}(T_r) = \int_{T_r}^T (c_{pL})_i dT + (\Delta H_{LV})_i(T)$$

$$\Delta H_3(T_r)$$

$$x_{A,3} \int_{T_r}^T (c_{pL})_A dT + x_{B,3} \int_{T_r}^T (c_{pL})_B dT$$



Regla de la Palanca



Balance General de Materia:

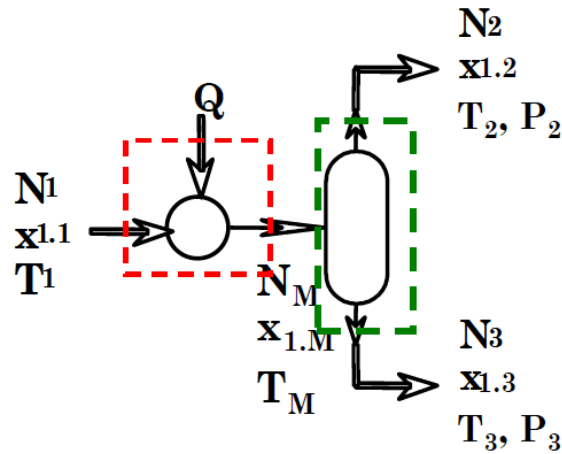
$$N_1 = N_M$$

Balance de Energía, utilizando T_r líquido como referencia:

$$N_1 \Delta H_1(T_r) + Q = N_M \Delta H_M(T_r)$$

$$\Delta H_M(T_r) = \Delta H_1(T_r) + \frac{Q}{N_1}$$

Regla de la Palanca



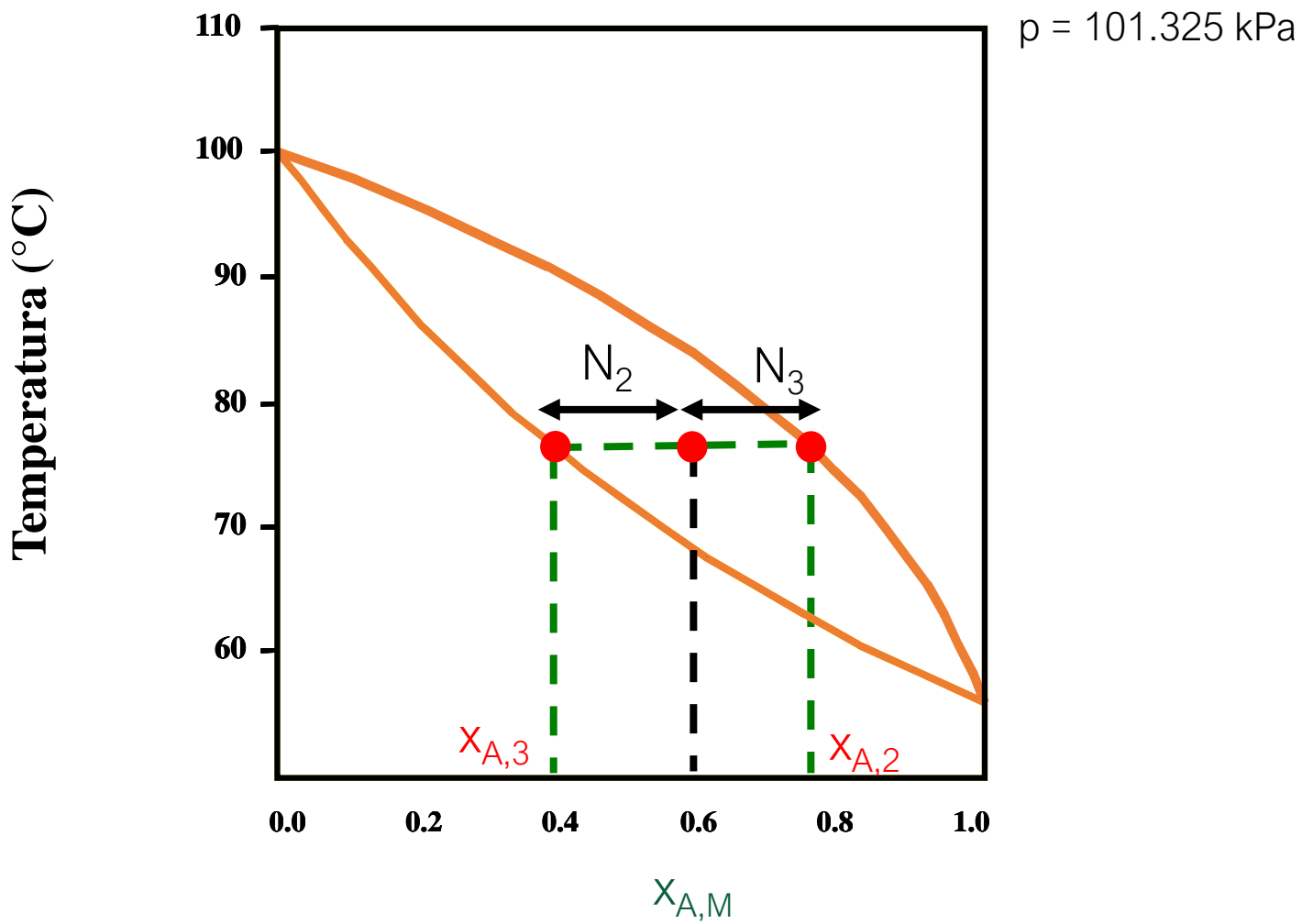
Balance General de Materia:

$$N_M = N_2 + N_3$$

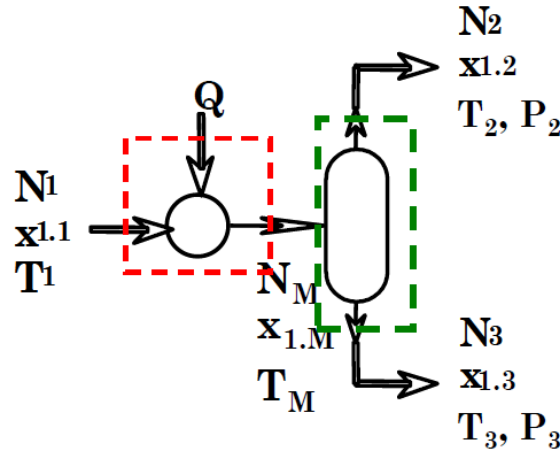
Balance de Materia del Compuesto A:

$$N_M x_{A,M} = N_2 x_{A,2} + N_3 x_{A,3}$$

$$\frac{N_2}{N_3} = \frac{x_{A,M} - x_{A,3}}{x_{A,2} - x_{A,M}}$$



Regla de la Palanca



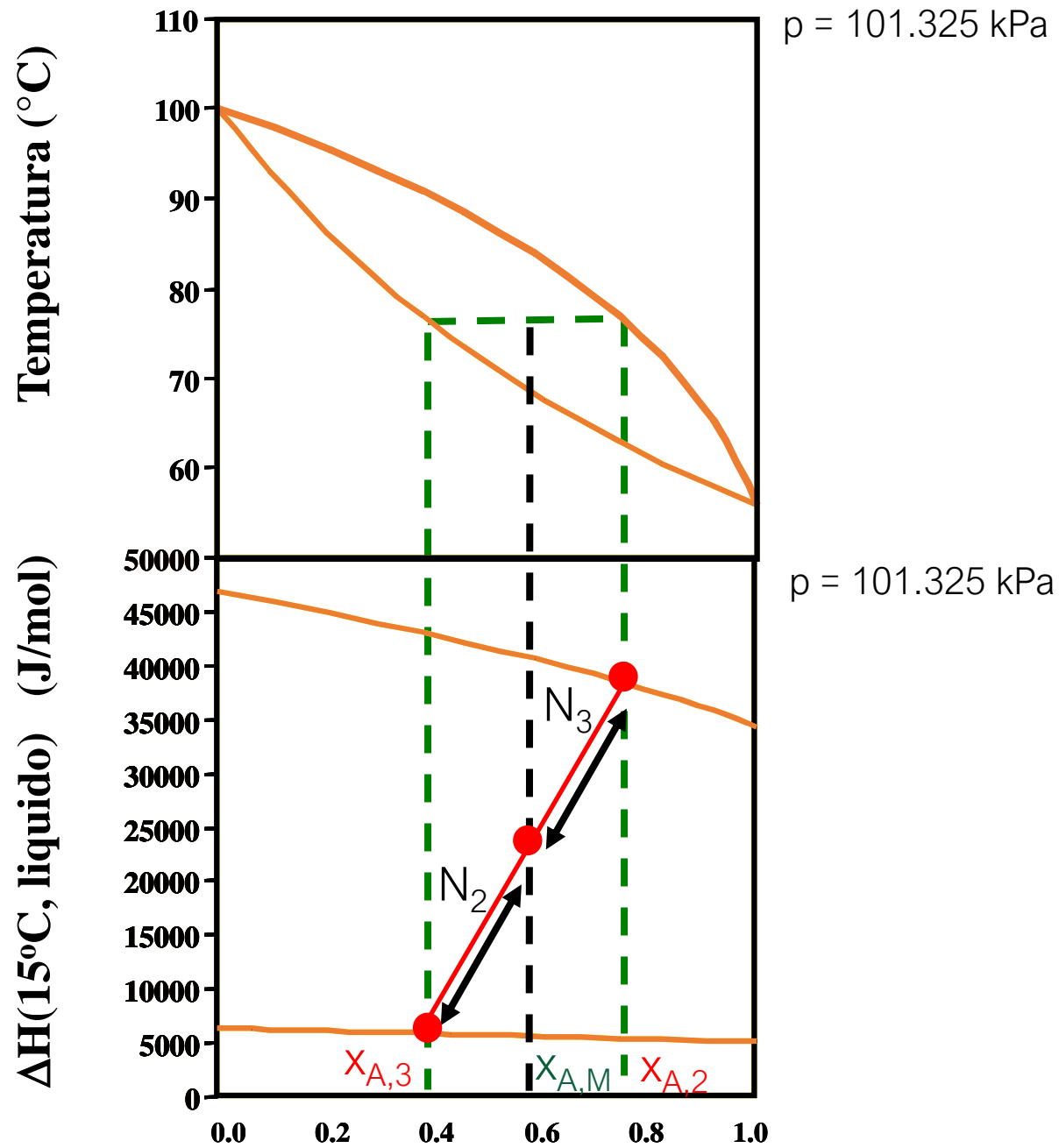
Balance General de Materia:

$$N_M = N_2 + N_3$$

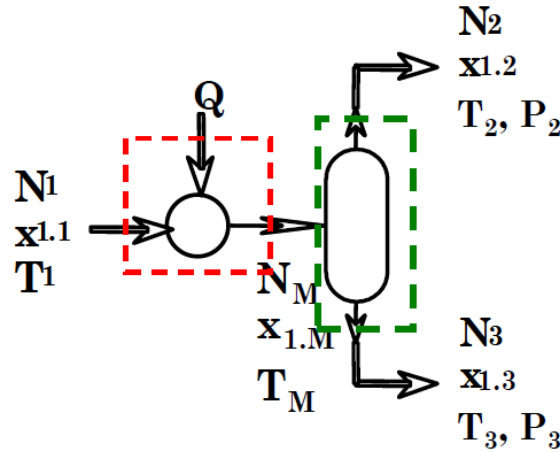
Balance de Energía, utilizando T_r líquido como referencia:

$$N_M \Delta H_1(T_r) = N_2 \Delta H_2(T_r) + N_3 \Delta H_3(T_r)$$

$$\frac{N_2}{N_3} = \frac{\Delta H_M(T_r) - \Delta H_3(T_r)}{\Delta H_2(T_r) - \Delta H_M(T_r)}$$



Regla de la Palanca: Unión de ambos balances



Balance de Materia del Compuesto A:

$$\frac{N_2}{N_3} = \frac{x_{A,M} - x_{A,3}}{x_{A,2} - x_{A,M}}$$

Balance de Energía, utilizando T_r líquido como referencia:

$$\frac{N_2}{N_3} = \frac{\Delta H_M(T_r) - \Delta H_3(T_r)}{\Delta H_2(T_r) - \Delta H_M(T_r)}$$

Regla de la Palanca: Unión de ambos balances

Igualando ambas ecuaciones:

$$\frac{N_2}{N_3} = \frac{x_{A,M} - x_{A,3}}{x_{A,2} - x_{A,M}} = \frac{\Delta H_M(T_r) - \Delta H_3(T_r)}{\Delta H_2(T_r) - \Delta H_M(T_r)}$$

$$\frac{\Delta H_2(T_r) - \Delta H_M(T_r)}{x_{A,2} - x_{A,M}} = \frac{\Delta H_M(T_r) - \Delta H_3(T_r)}{x_{A,M} - x_{A,3}}$$

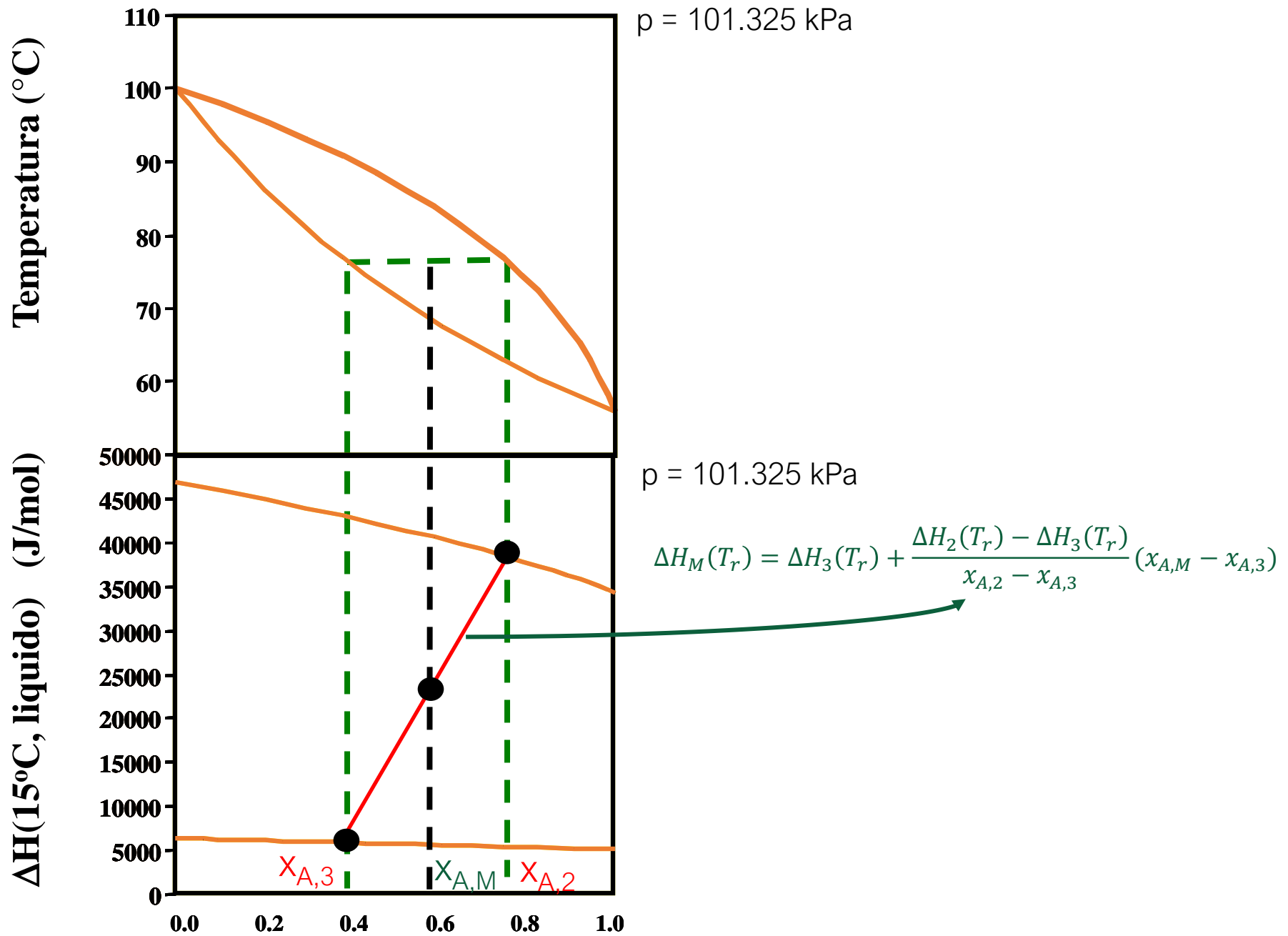
$$\Delta H_M(T_r) = \Delta H_3(T_r) + \frac{\Delta H_2(T_r) - \Delta H_3(T_r)}{x_{A,2} - x_{A,3}} (x_{A,M} - x_{A,3})$$

Que es la ecuación de una línea recta en un diagrama entalpía-composición construido utilizando T_r como condición de referencia.

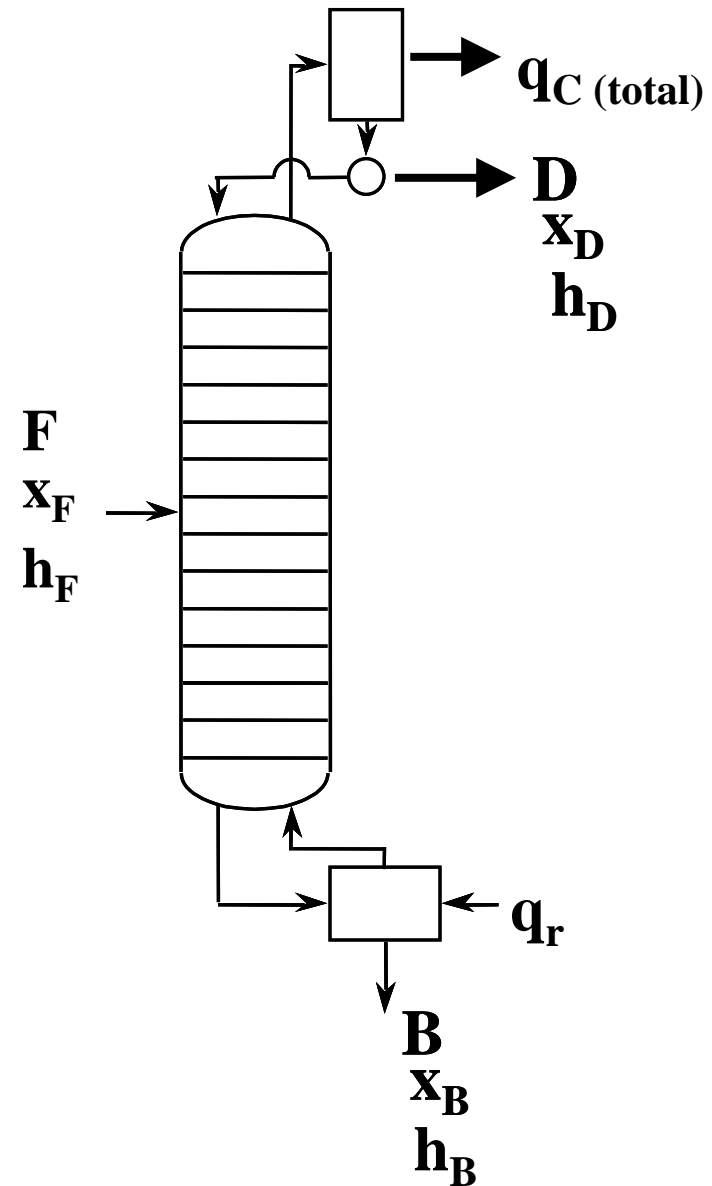
Con pendiente:

Y pasa por lo puntos

$$m = \frac{\Delta H_2(T_r) - \Delta H_3(T_r)}{x_{A,2} - x_{A,3}} \quad (x_{A,M}, \Delta H_M); (x_{A,3}, \Delta H_3)$$



Volvamos a nuestra columna de destilación fraccionada



Balance de Global de Materia:

$$F = D + B$$

Balance de Materia del Compuesto A:

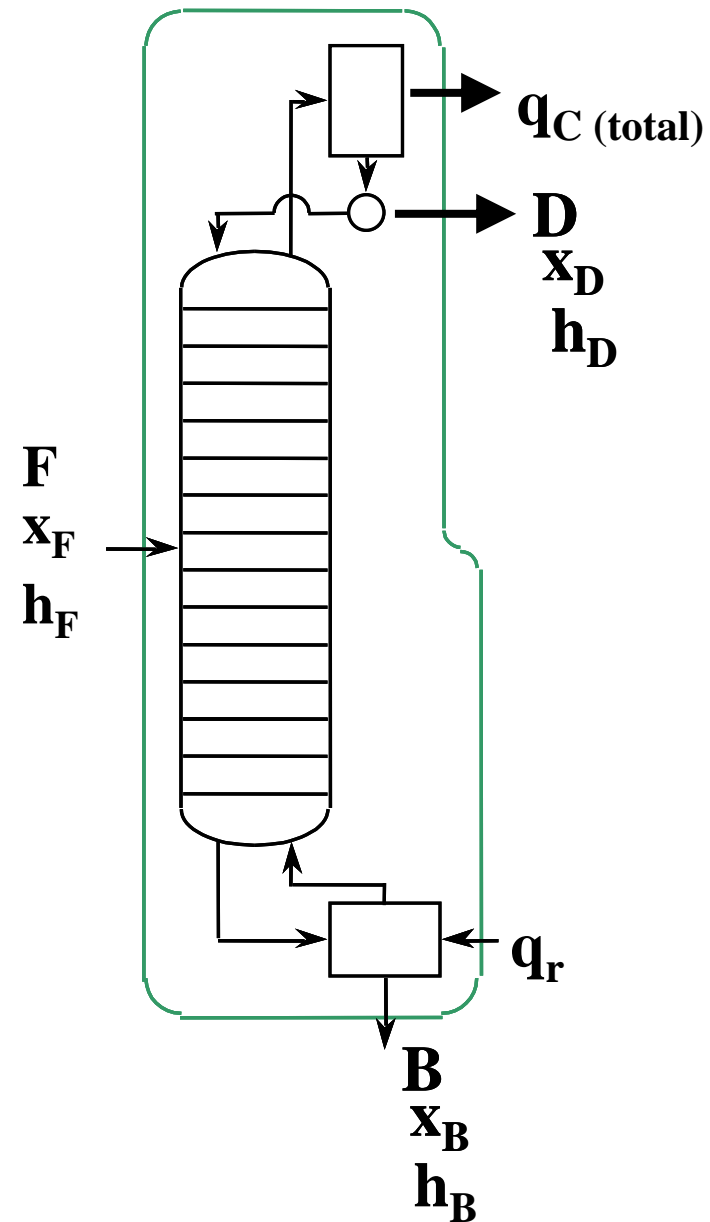
$$Fx_F = Dx_D + Bx_B$$

Balance de Global de Energía:

$$\underbrace{Fh_F + q_r}_{\text{Energía del Hervidor}} = \underbrace{Dh_D + Bh_B + q_c}_{\text{Energía del Condesador}}$$

Energía del
Hervidor

Energía del
Condesador



OJO: para simplificar la notación, denominaremos H = entalpía del vapor y h = entalpía del líquido

Balance de Global de Materia:

$$F = D + B$$

Balance de Materia del Compuesto A:

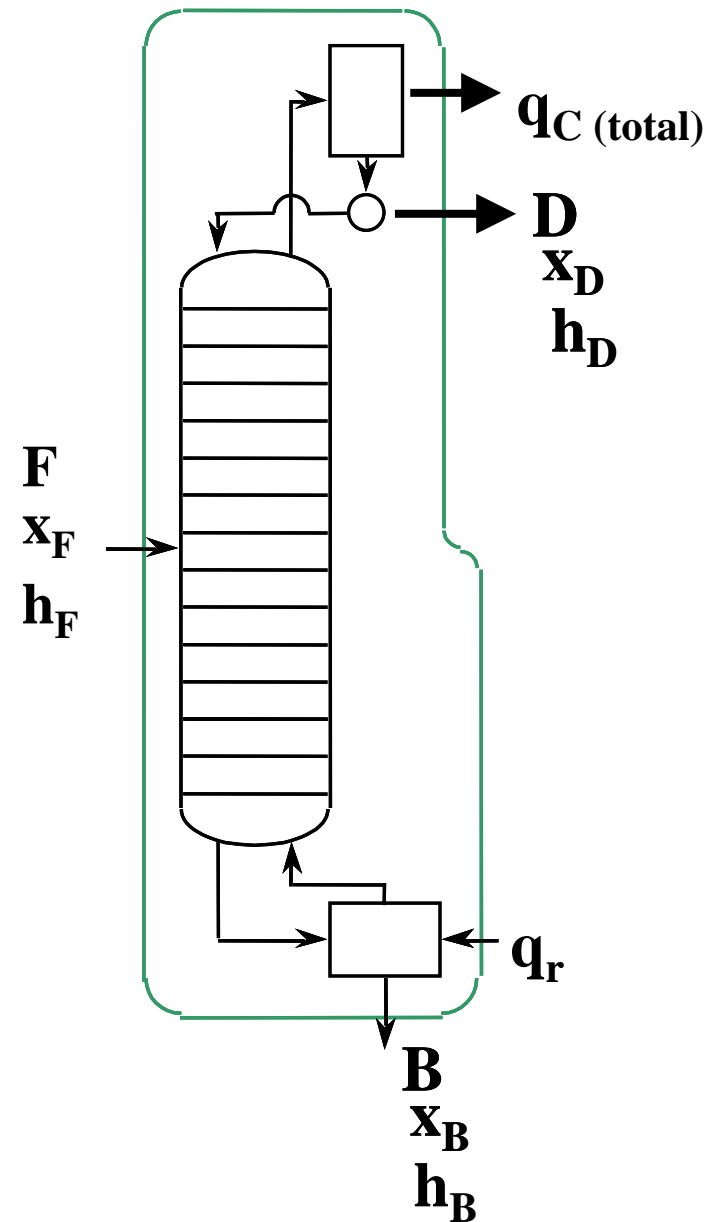
$$Fx_F = Dx_D + Bx_B$$

Balance de Global de Energía:

$$Fh_F + q_r = Dh_D + Bh_B + q_c$$

$$Fh_F = D \underbrace{\left(h_D + \frac{q_c}{D} \right)}_{Q_c} + B \underbrace{\left(h_B - \frac{q_r}{B} \right)}_{Q_r}$$

$$Fh_F = DQ_c + BQ_r$$



OJO: para simplificar la notación, denominaremos H = entalpía del vapor y h = entalpía del líquido

Balance de Global de Materia:

$$F = D + B$$

Balance de Materia del Compuesto A:

$$\frac{D}{B} = \frac{x_F - x_B}{x_D - x_F}$$

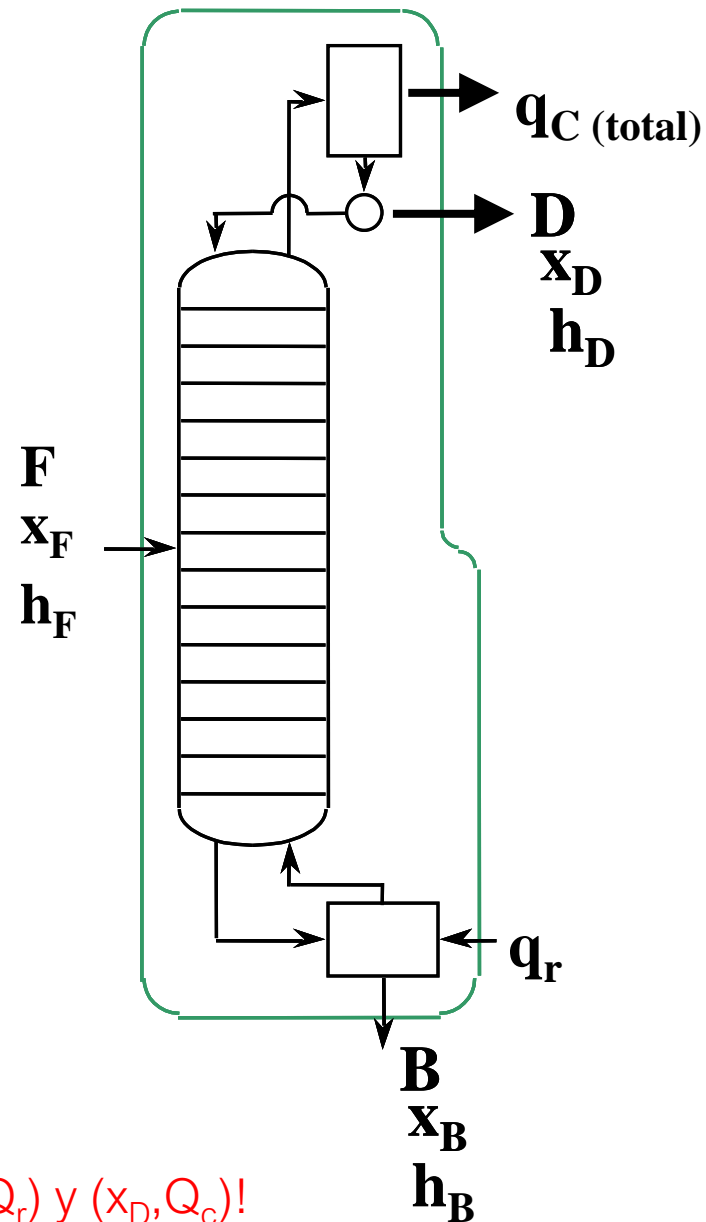
Balance de Global de Energía:

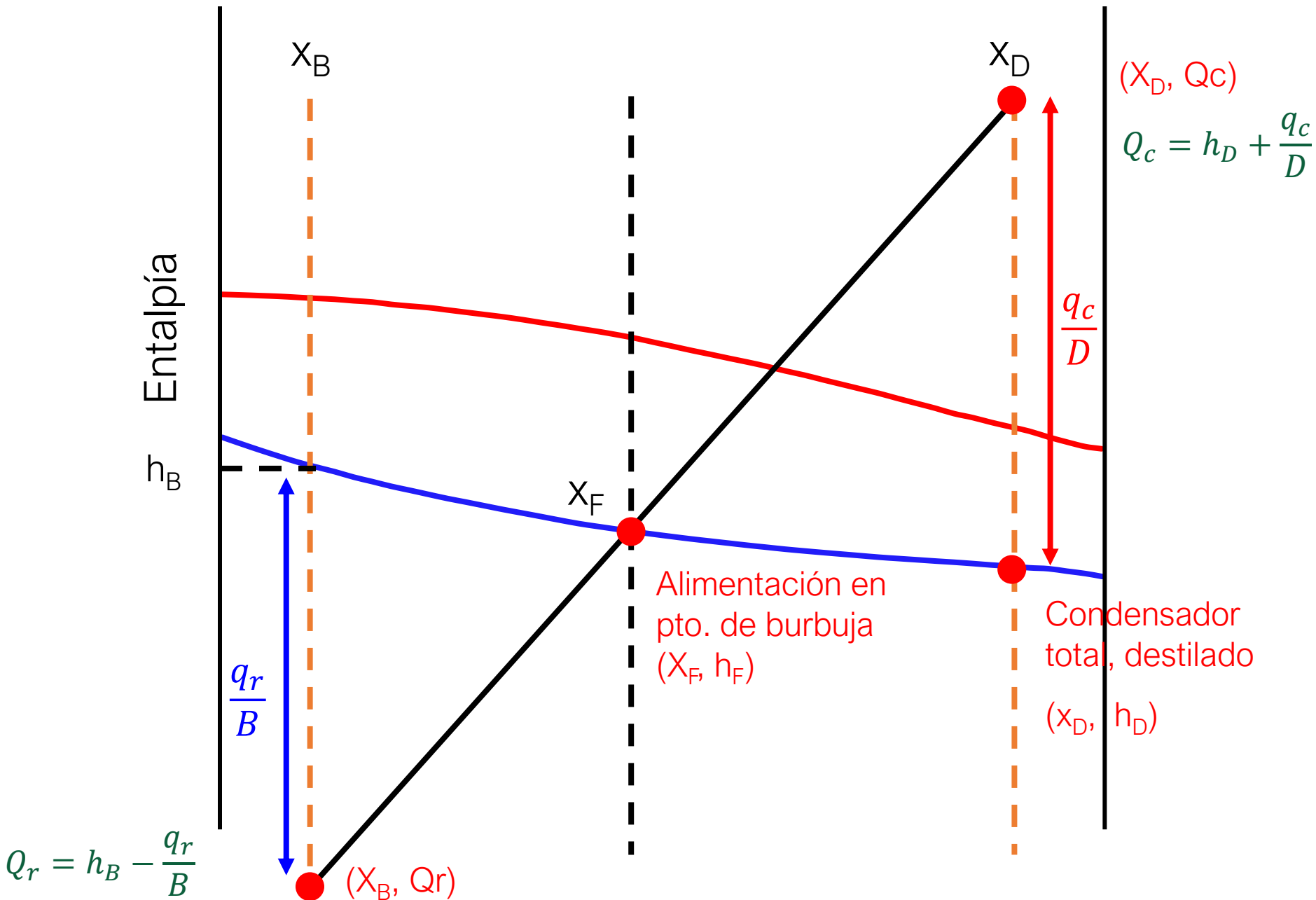
$$\frac{D}{B} = \frac{h_F - Q_r}{Q_c - h_F}$$

Igualando ambos balances:

$$\frac{D}{B} = \frac{x_F - x_B}{x_D - x_F} = \frac{h_F - Q_r}{Q_c - h_F}$$

¡Existe una línea que pasa por los puntos (x_F, h_F) (x_B, Q_r) y (x_D, Q_c) !





Conceptos Revisados en la Clase

- Comprender el diagrama de entalpía-composición en una mezcla líquida-vapor
- Comprender el balance general de energía en una columna de destilación
- Aprender a localizar corrientes relevantes en la destilación en un gráfico entalpía-composición, y su utilidad.

Balances de energía en columna de destilación

IIQ2023 - Operaciones Unitarias II

José Rebolledo Oyarce

6 de Abril de 2021

