

GUÍAS 5y6 - Destilación

Problema 8

1° Cuatrimestre - 2025

Enunciado

Una mezcla conteniendo 50% molar de metanol, 20% de etanol, 20% de propanol y 10% de butanol será fraccionada en una columna para obtener un destilado con hasta 5% del butanol de entrada. Como especificación adicional se impone que el 90% del metanol que ingresa a la torre se obtenga por el tope.

Para el diseño preliminar se puede suponer un caudal de 1000 kmol/h, ingresando a la torre a 80°C y 1 atm.

$$\log(P_i[\text{mmHg}]) = A - \frac{B}{T[^\circ\text{C}] + C}$$

Componente	A	B	C
Metanol	8,0724	1574,99	238,87
Etanol	8,2133	1652,05	231,48
Propanol	7,6192	1375,14	193,01
Butanol	7,4768	1362,39	178,73

Enunciado

Se pide calcular:

- a) La condición de alimentación**
- b) Las temperaturas extremas de la columna**
- c) El número de platos mínimos y la distribución a reflujo total**
- d) El reflujo mínimo y la distribución de los componentes a número de platos infinitos**
- e) Para una relación de 1,5 veces la mínima, determinar la distribución de los componentes, la cantidad de platos y el plato de alimentación**

Desarrollo

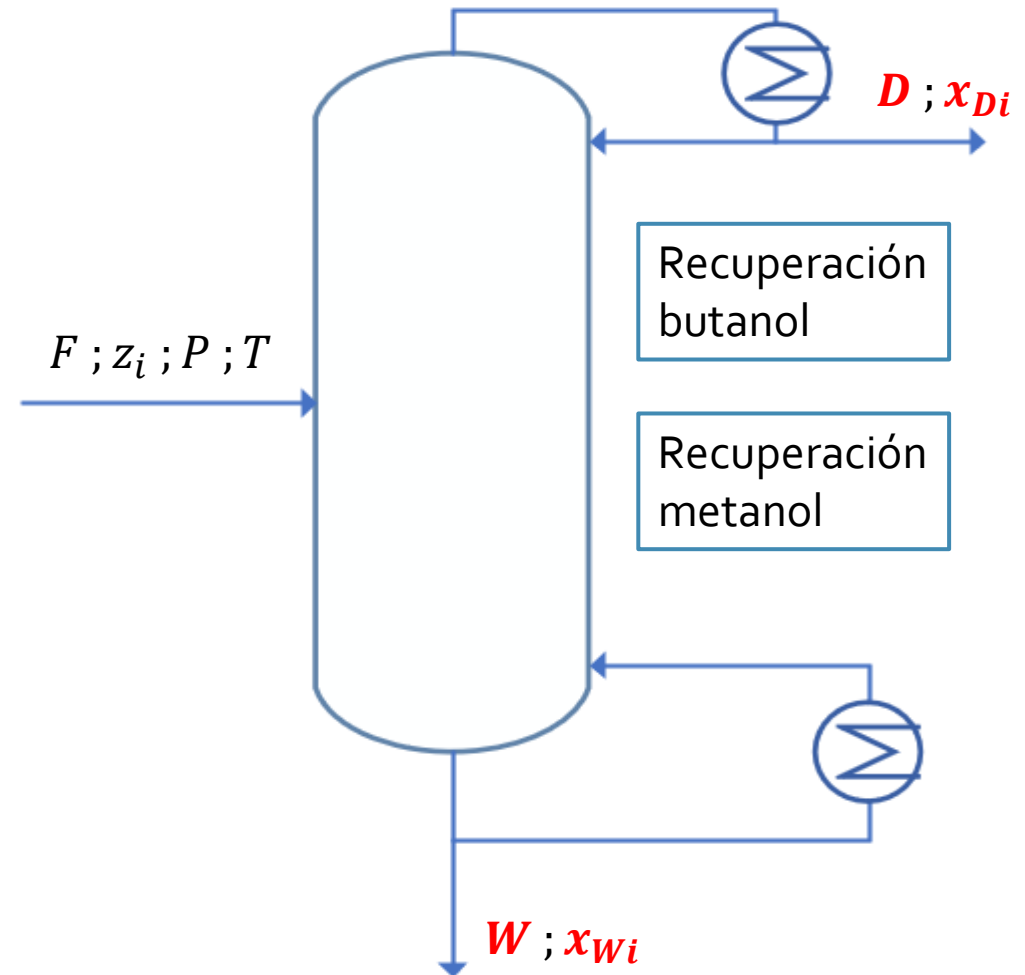
Condición de alimentación



Conocer el título de la corriente de entrada, junto con las composiciones de cada componente en cada una de las fases



Rachford - Rice



Desarrollo – Condición de F

$$F = V + L$$

$$F \cdot z_i = V \cdot y_i + L \cdot x_i$$

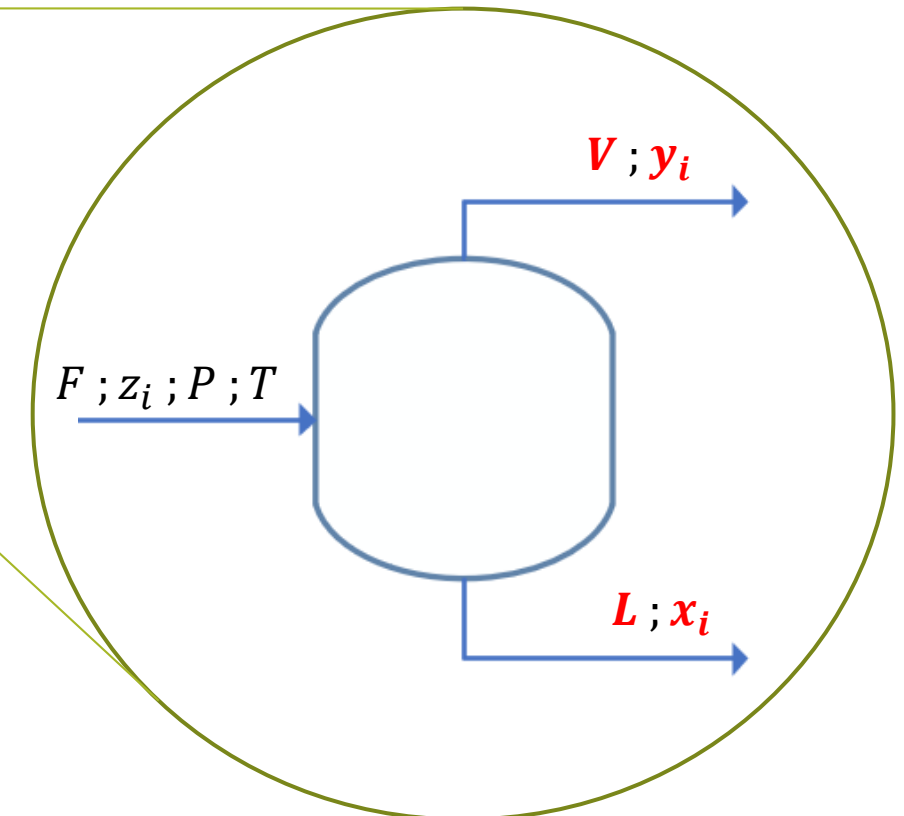
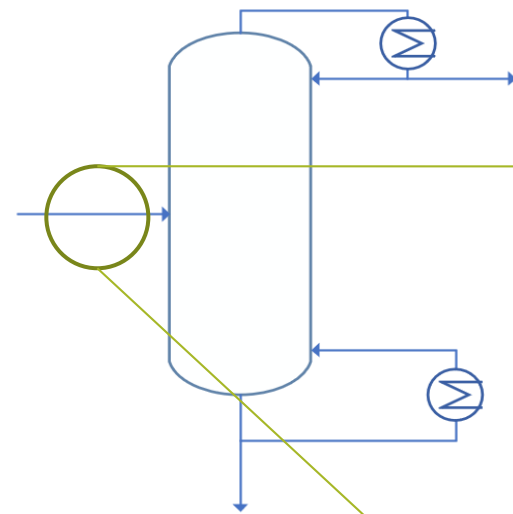
$$y_i = k_i \cdot x_i$$

$$k_i = \frac{P_i}{P}$$

$$\varphi = \frac{V}{F} = 1 - q$$

$$0 = \sum_{i=1}^n \frac{z_i \cdot (1 - k_i)}{1 + \varphi \cdot (k_i - 1)}$$

Rachford - Rice



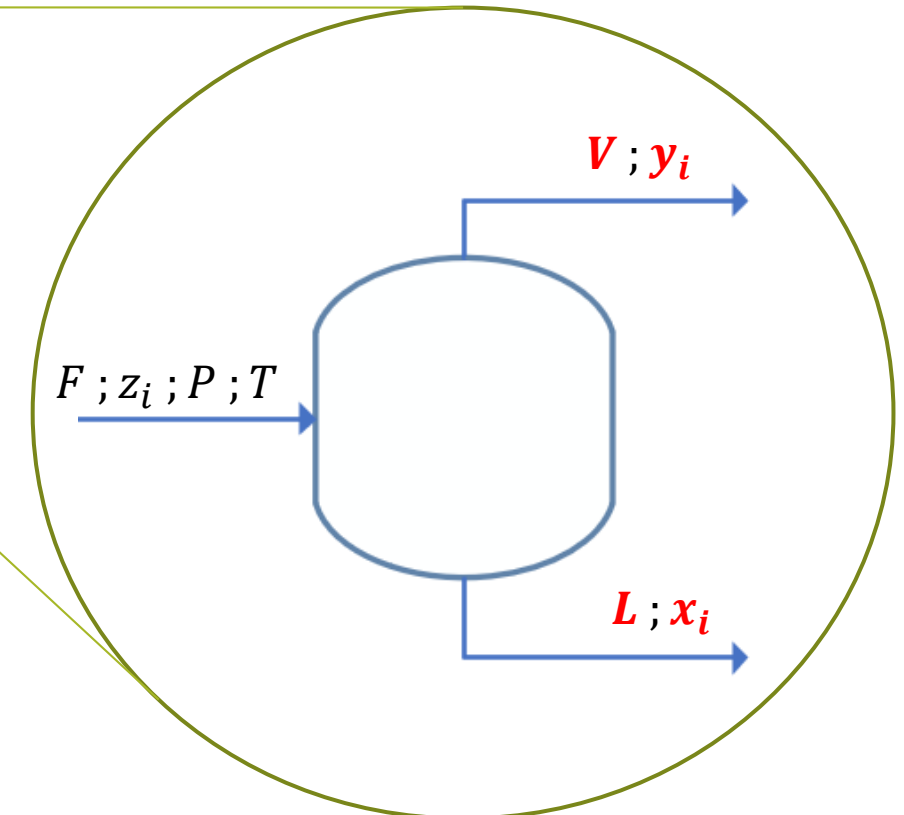
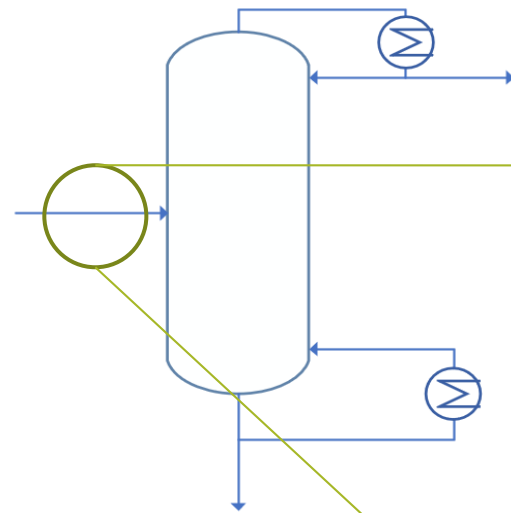
Desarrollo – Condición de F

$$0 = \sum_{i=1}^n \frac{z_i^F \cdot (1 - k_i^F)}{1 + \varphi^F \cdot (k_i^F - 1)}$$

¿Qué conozco de esta ecuación?

$$P_i^F = 10^{\left(A - \frac{B}{T^F + C}\right)}$$

$$k_i^F = \frac{P_i^F}{P^F}$$



	$z_i(F)$	A	B	C	$P_i(\text{sat})$	$k_i(F)$
Metanol	0,5	8,07	1574,99	238,87	1359	1,79
Etanol	0,2	8,21	1652,05	231,48	812	1,07
Propanol	0,2	7,62	1375,14	193,01	382	0,50
Butanol	0,1	7,48	1362,39	178,73	163	0,21

Desarrollo – Condición de F

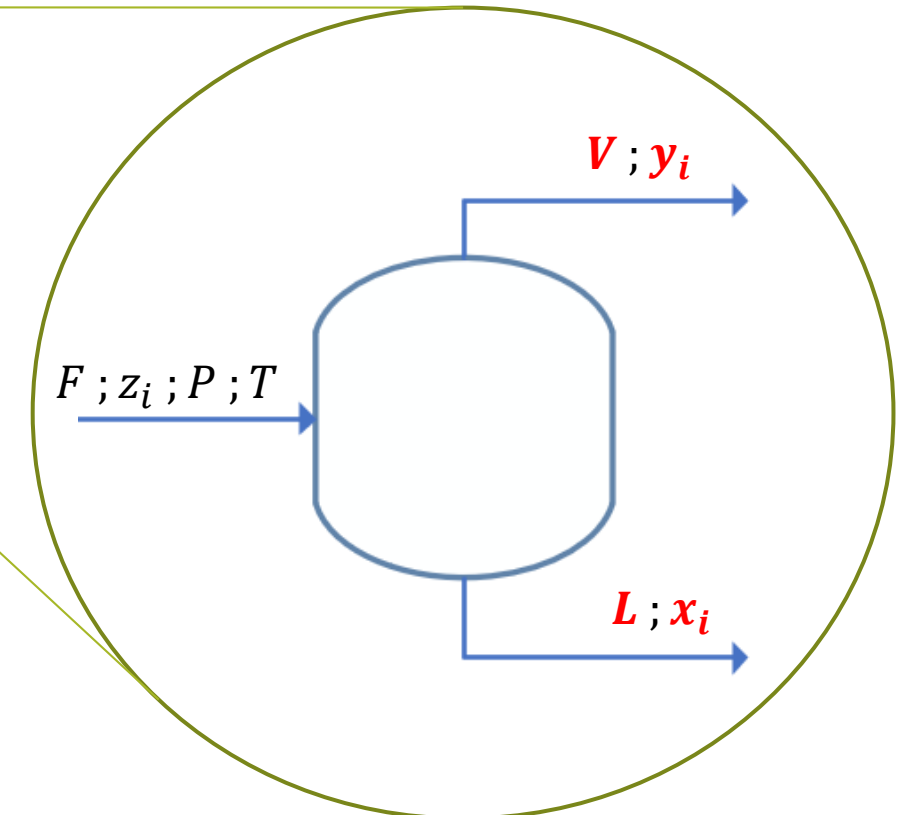
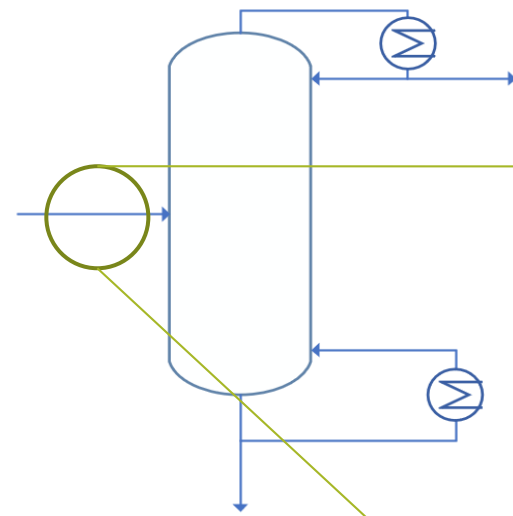
$$0 = \sum_{i=1}^n \frac{z_i^F \cdot (1 - k_i^F)}{1 + \varphi^F \cdot (k_i^F - 1)}$$

Obtengo el título de la corriente



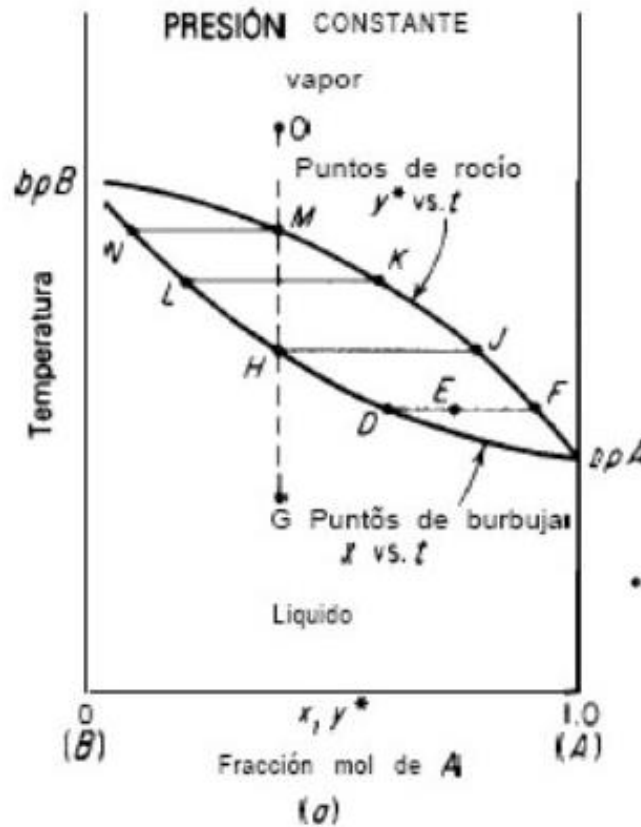
$$\varphi^F = 0,58$$

Mezcla líquido - vapor

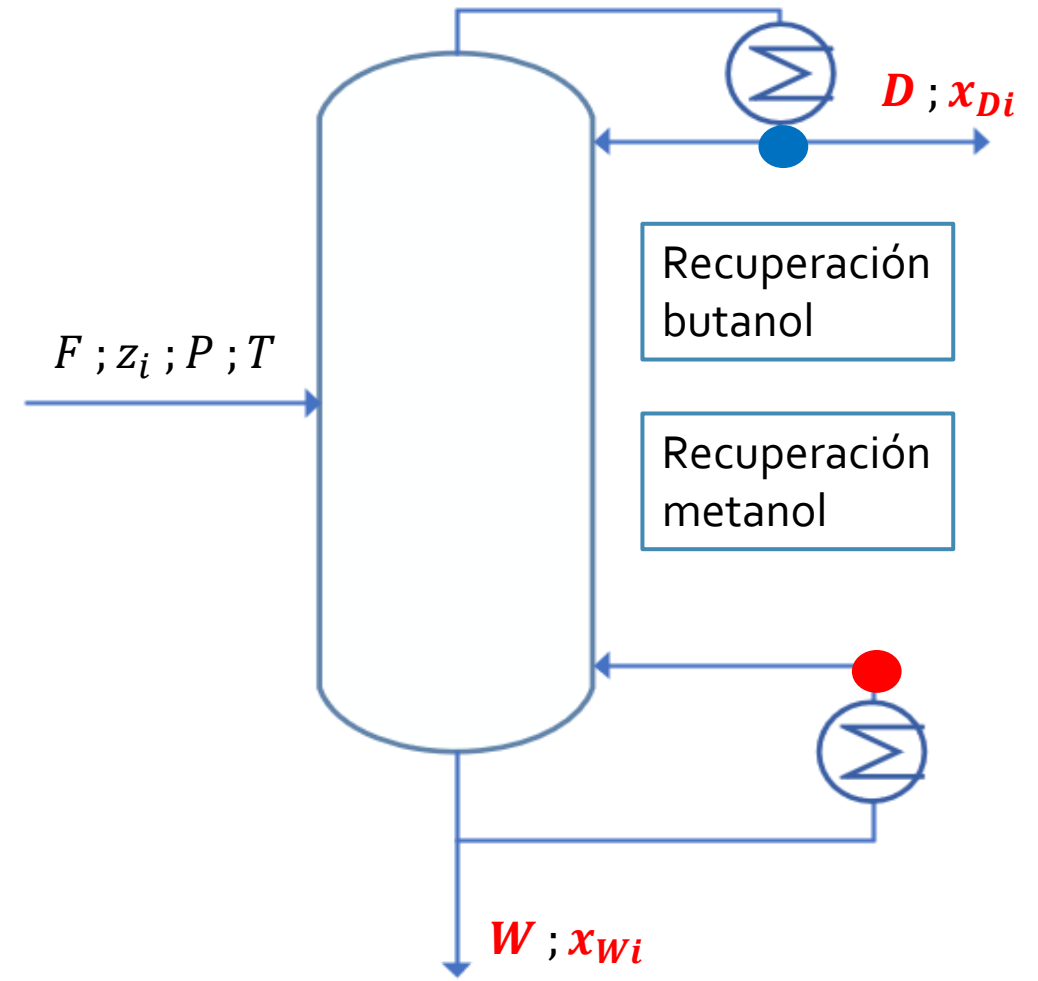


Desarrollo – Temperaturas Extremas

¿Dónde se dan las temperaturas extremas?



¡OJO!
¡Los cambios de estado
no son isotérmicos!



Desarrollo – Temperaturas Extremas

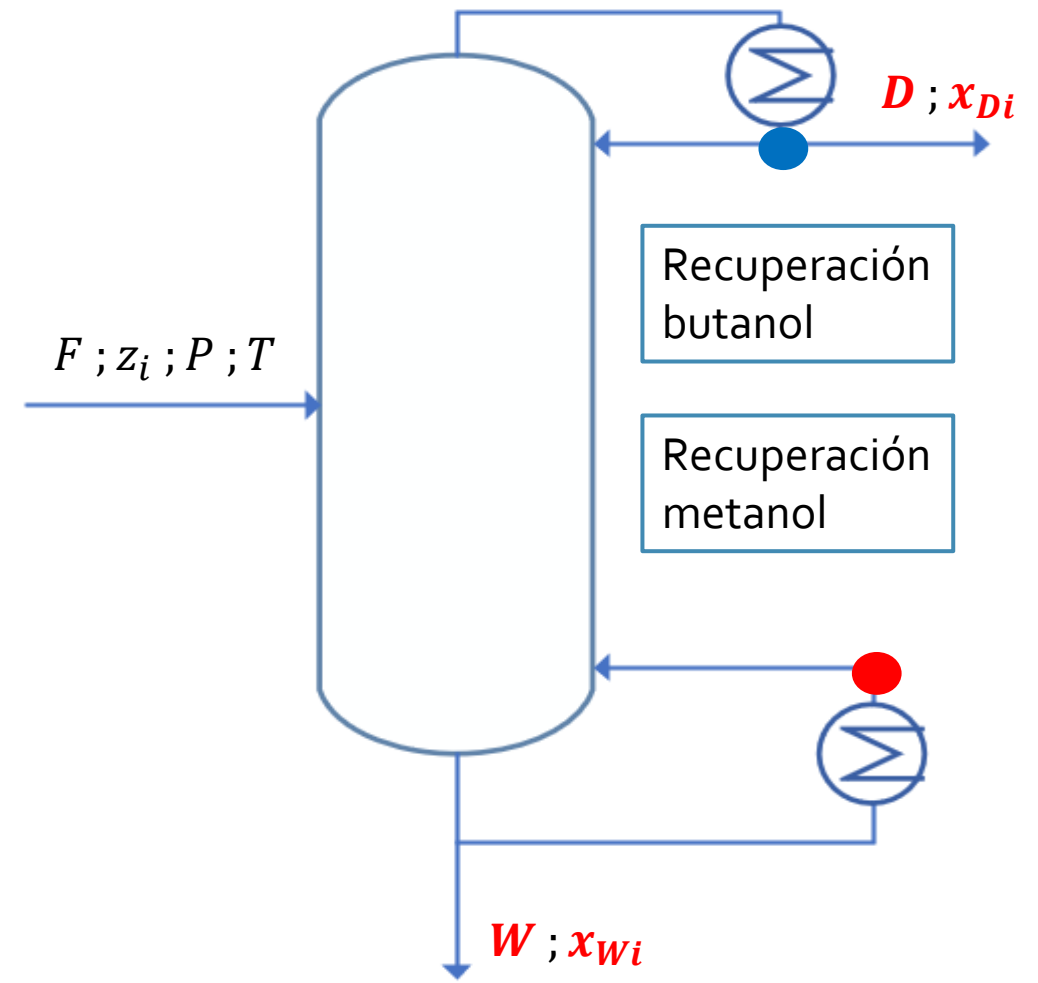
¿Por qué estas temperaturas son importantes?

¿Y si la temperatura me da fuera de lo que mis servicios pueden llegar?

¿Qué variable puedo modificar?

¿Qué más necesito para calcular estas temperaturas?

$$0 = \sum_{i=1}^n \frac{z_i \cdot (1 - k_i)}{1 + \varphi \cdot (k_i - 1)}$$



Desarrollo – Temperaturas Extremas

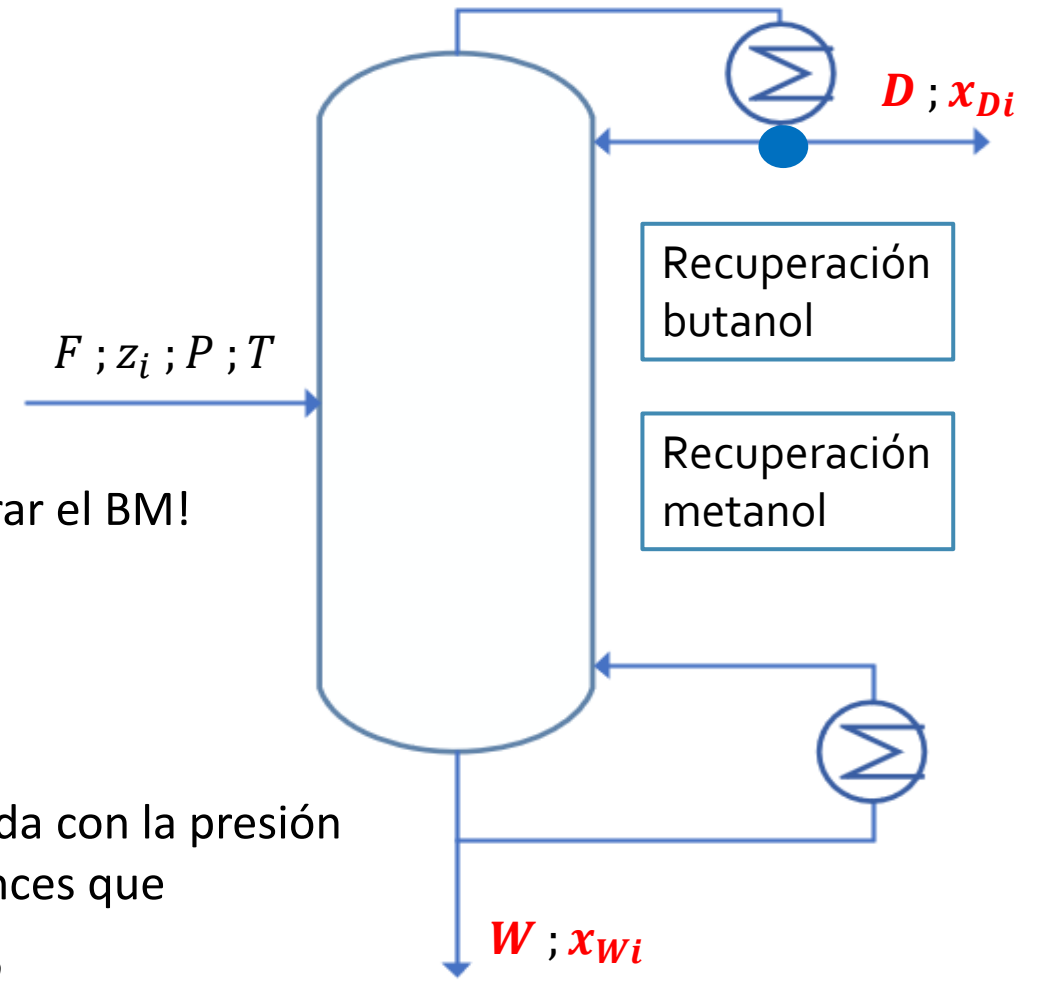
$$0 = \sum_{i=1}^n \frac{z_i^D \cdot (1 - k_i^D)}{1 + \varphi^D \cdot (k_i^D - 1)}$$

D es líquido saturado

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi^D = 0 \\ z_i^D = x_{Di} \\ k_i^D = f(T^D, P^D) \end{array} \right. \quad \text{¡Necesito cerrar el BM!}$$

Si bien no la conozco, está relacionada con la presión de entrada. Se puede suponer entonces que

$$P^D = P^F - \Delta P_{\text{típico}}$$

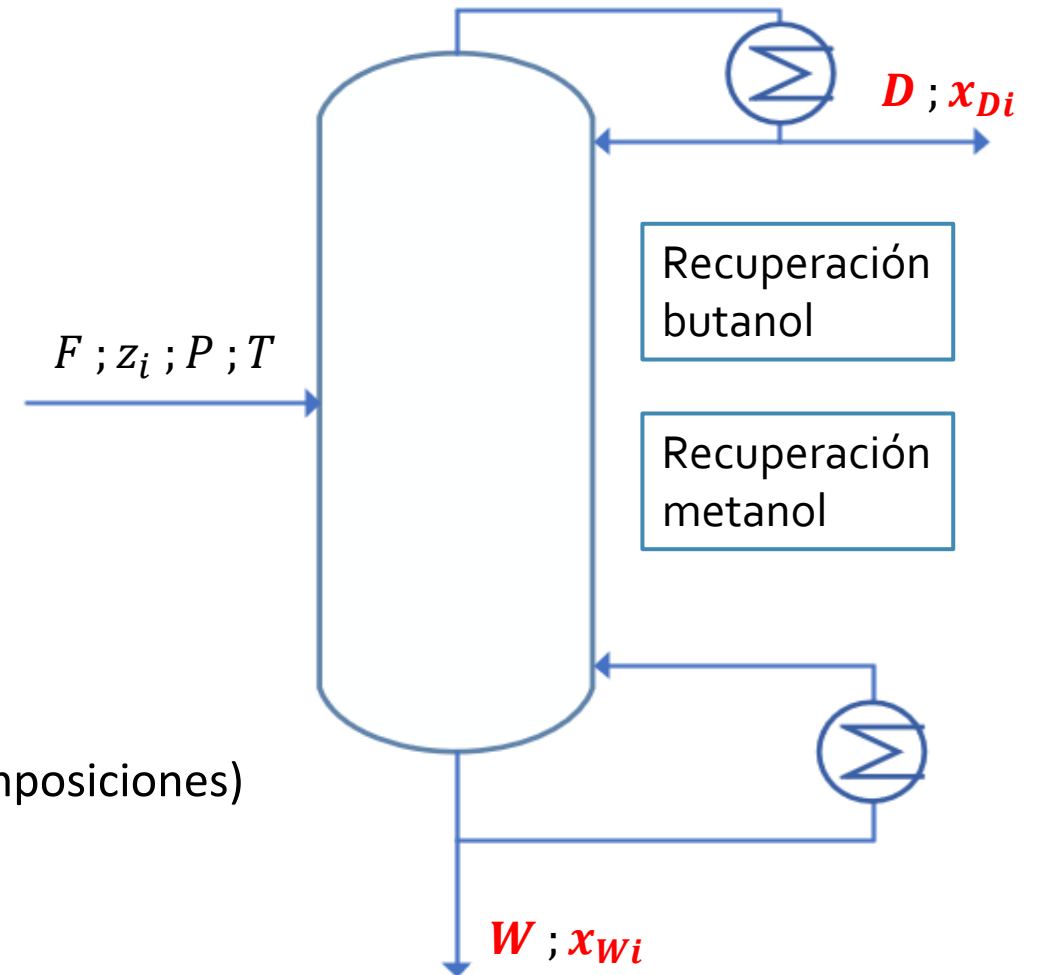


Desarrollo – Temperaturas Extremas

Balance de masa

	[kmol/h]		
	$z_i^F \cdot F$	$x_{Di} \cdot D$	$x_{Wi} \cdot W$
Metanol	500	450	50
Etanol	200		
Propanol	200		
Butanol	100	5	95
Total	1000		

- Ordenar los componentes según su volatilidad
- Expresar el balance de masa en función de caudales (no de composiciones)
- Expresar solamente los valores que son datos
- Definir los compuestos clave



Desarrollo – Temperaturas Extremas

Balance de masa

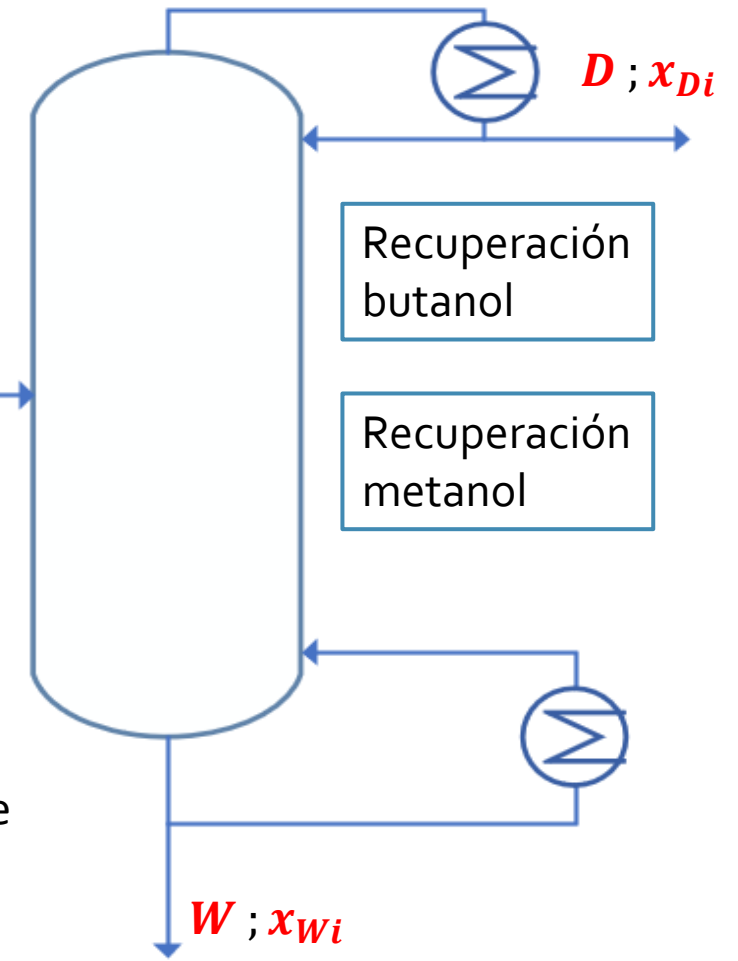
	[kmol/h]		
	$z_i^F \cdot F$	$x_{Di} \cdot D$	$x_{Wi} \cdot W$
Metanol	500	450	50
Etanol	200		
Propanol	200		
Butanol	100	5	95
Total	1000		

LK

Compuestos
entre - clave

HK

$F ; z_i ; P ; T$



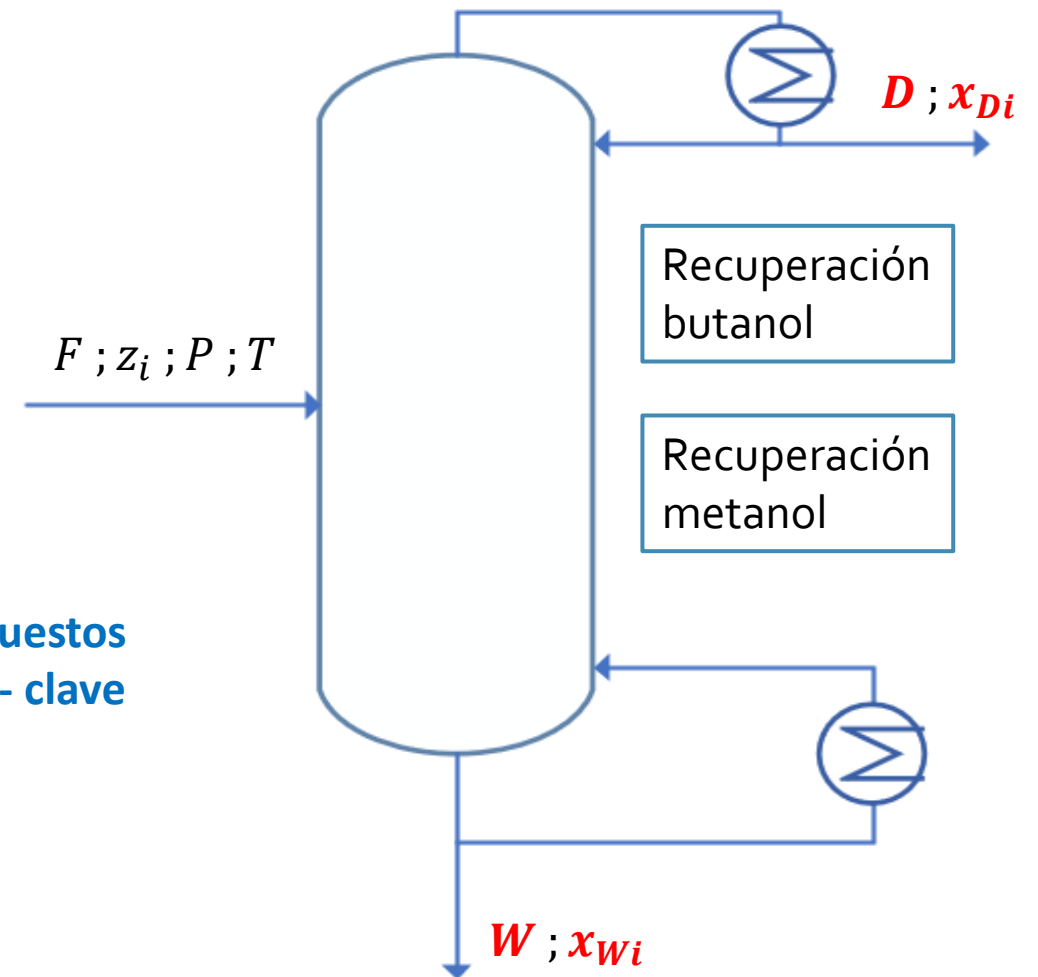
- Clave liviana: Componente más liviano que se obtiene por el fondo de la torre
- Clave pesada: Componente más pesado que se obtiene por el destilado de la torre
- Compuestos entre claves: se distribuyen entre el destilado y el fondo

Desarrollo – Temperaturas Extremas

¿Por qué son importantes los componentes clave?

	[kmol/h]		
	$z_i^F \cdot F$	$x_{Di} \cdot D$	$x_{Wi} \cdot W$
C1	100	100	0
C2	100	100	0
C3	100	100	0
C4	100	95	5
C5	100		
C6	100		
C7	100	10	90
C8	100	0	100
Total	800		

LK
}
Compuestos
entre - clave
HK



NOTA: tabla de ejemplo para mostrar los "beneficios" que trae a definición de compuestos clave

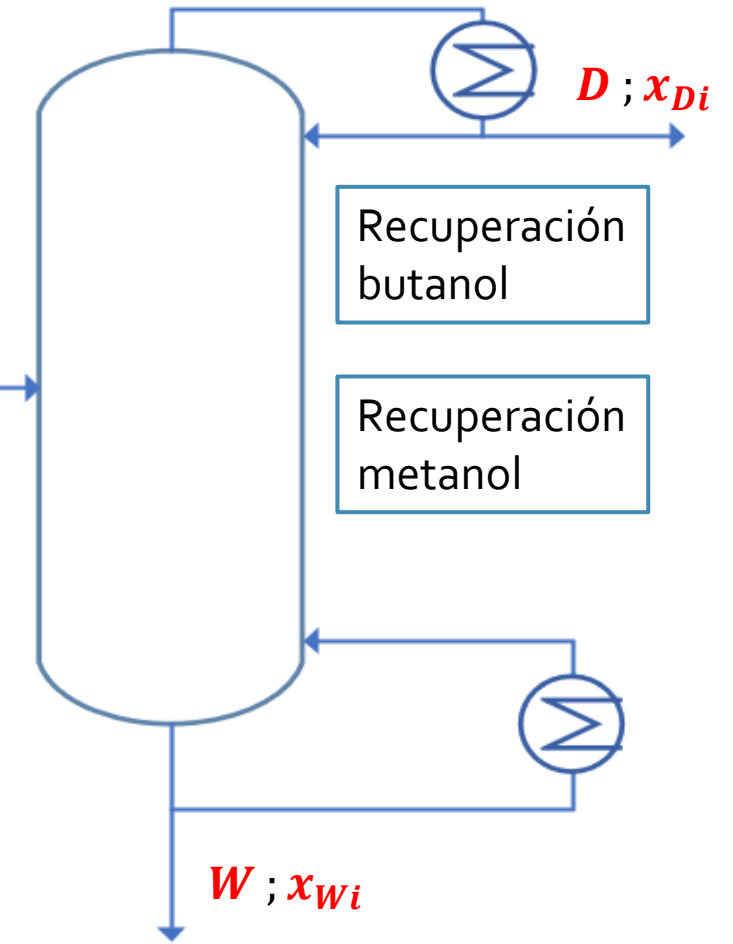
Desarrollo – Temperaturas Extremas

Balance de masa

	[kmol/h]		
	$z_i^F \cdot F$	$x_{Di} \cdot D$	$x_{Wi} \cdot W$
Metanol	500	450	50
Etanol	200		
Propanol	200		
Butanol	100	5	95
Total	1000		

LK
} Compuestos
entre - clave
HK

$F ; z_i ; P ; T$



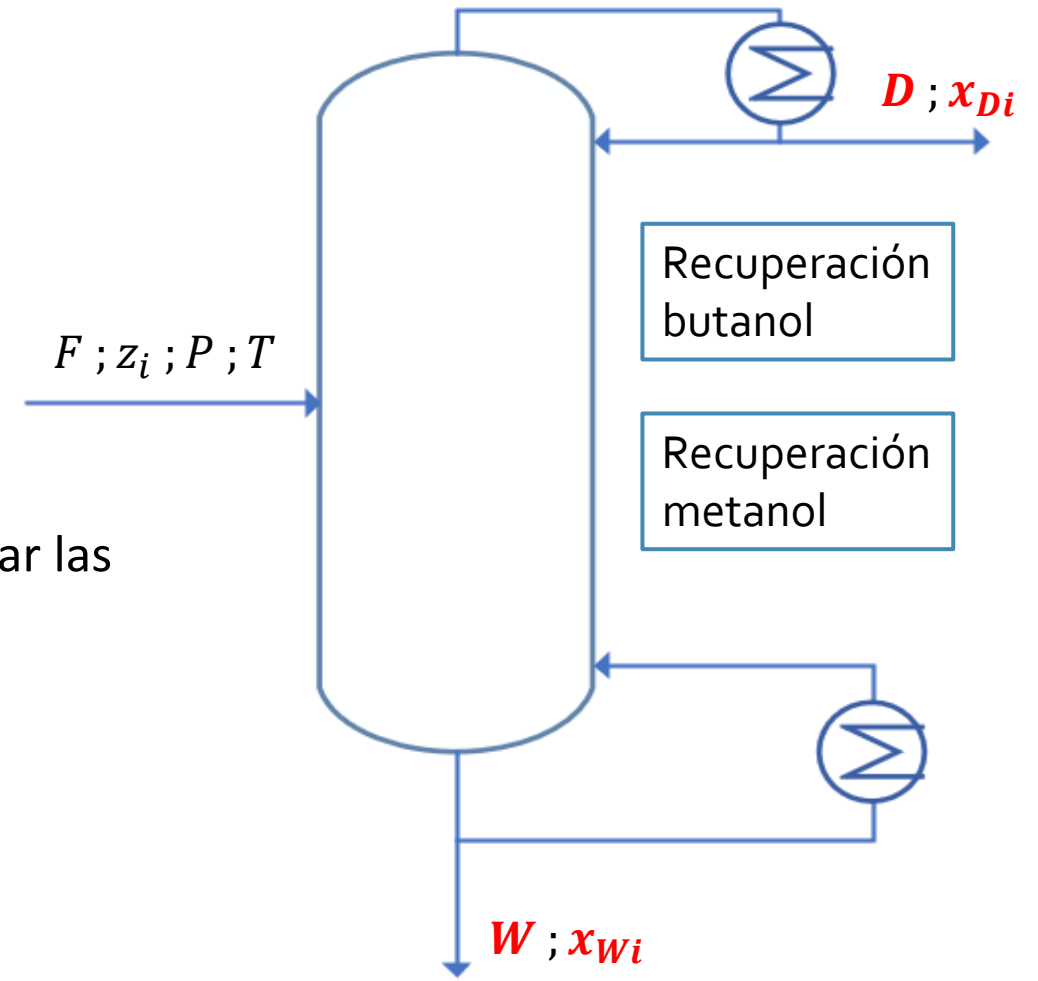
En este ejercicio no hay duda sobre cuáles son los componentes clave.
A veces no es tan claro y hay que tomar una decisión al elegirlos.

¡No hay una única posibilidad!

Desarrollo – Temperaturas Extremas

	[kmol/h]		
	$z_i^F \cdot F$	$x_{Di} \cdot D$	$x_{Wi} \cdot W$
Metanol	500	450	50
Etanol	200		
Propanol	200		
Butanol	100	5	95
Total	1000		

LK
} Compuestos
entre - clave
HK



Entonces necesitamos tener el BM cerrado para poder calcular las temperaturas extremas... pero en la tabla nos faltan datos

↓
ITERACIÓN

Vamos a suponer una distribución para los componentes entre - clave y después verificamos los valores propuestos

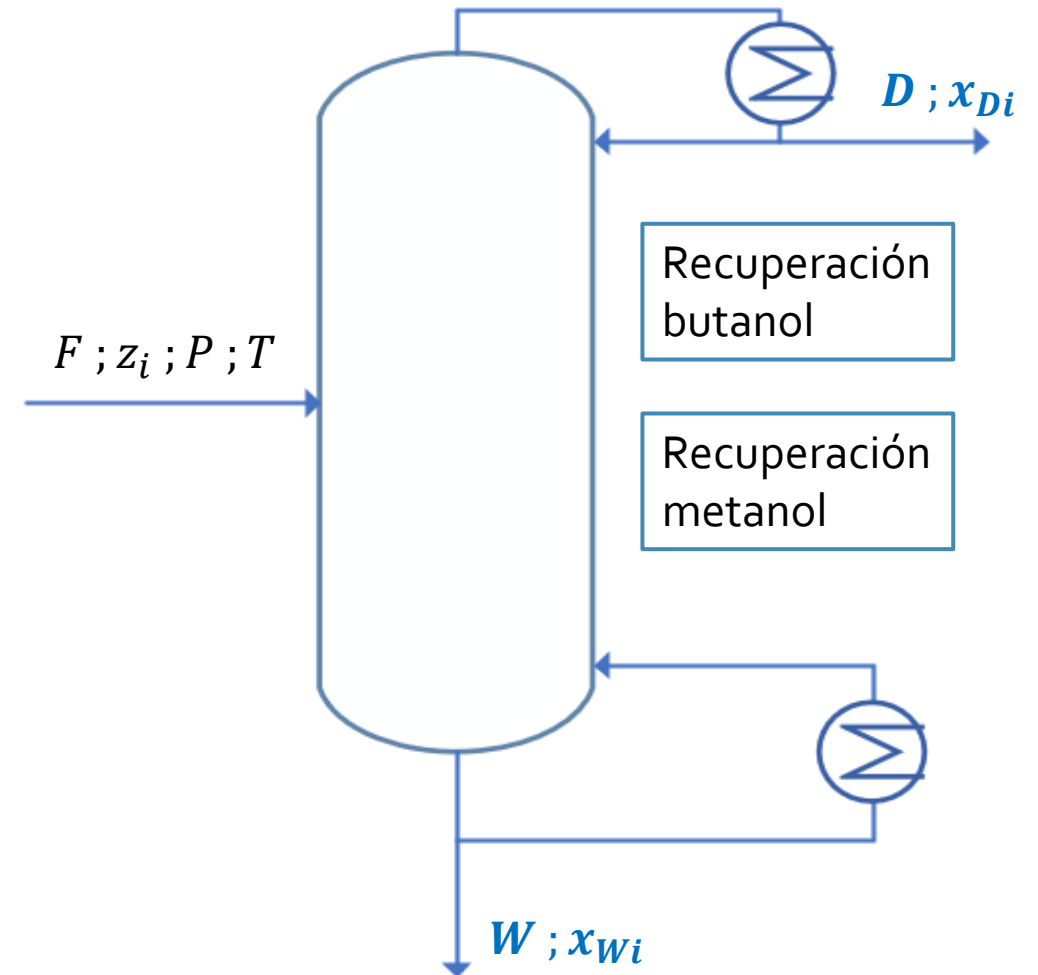
Desarrollo – Temperaturas Extremas

	[kmol/h]		
	$z_i^F \cdot F$	$x_{Di} \cdot D$	$x_{Wi} \cdot W$
Metanol	500	450	50
Etanol	200	103	97
Propanol	200	53	147
Butanol	100	5	95
Total	1000	<i>Lo que de</i>	<i>1000 – "lo que de"</i>

LK
HK
 } **Compuestos entre - clave**

¿En qué nos basamos para suponer estos valores?

- Acotar los valores a las recuperaciones de dato
- Tener en cuenta las similitudes entre los compuestos
- Tener en cuenta las volatilidades



Desarrollo – Temperaturas Extremas

$$0 = \sum_{i=1}^n \frac{z_i^D \cdot (1 - k_i^D)}{1 + \varphi^D \cdot (k_i^D - 1)}$$

Condición de Destilado

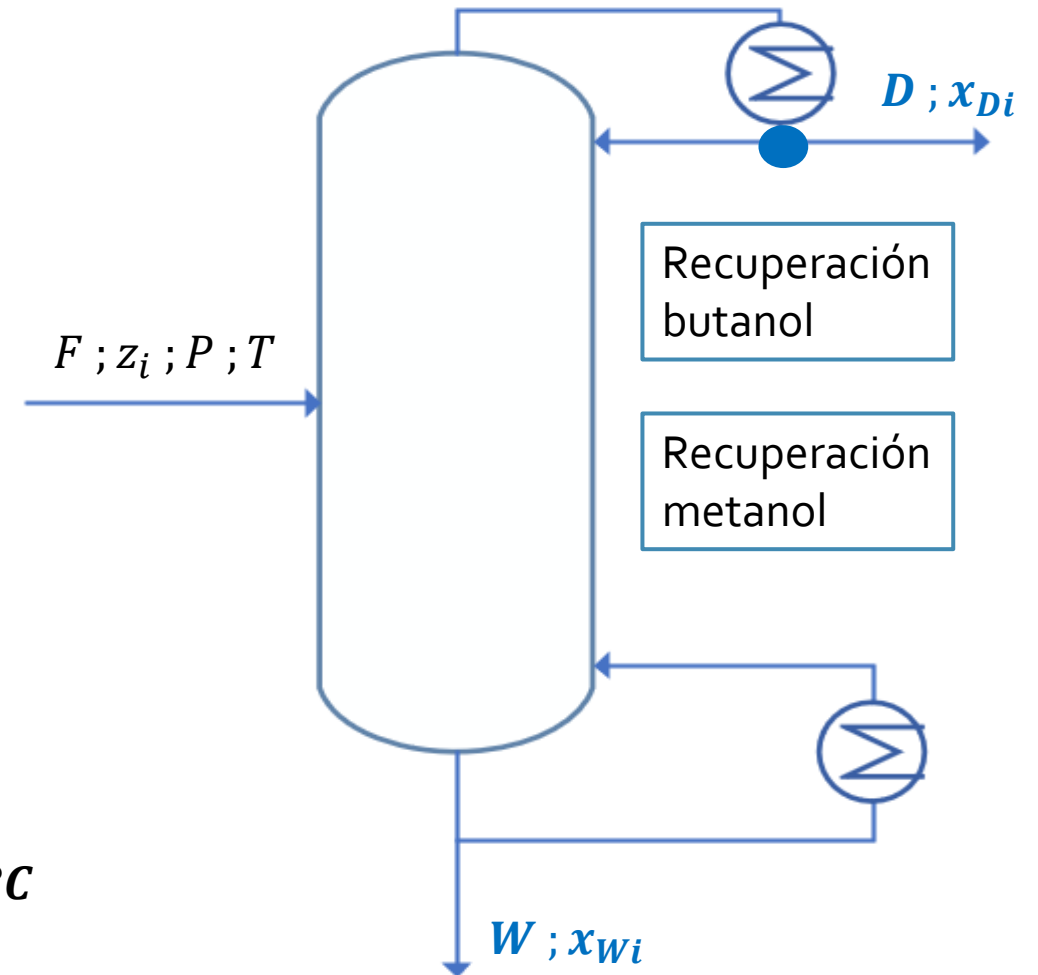
$$0 = \sum_{i=1}^n x_{Di} \cdot (1 - k_i^D)$$

Multiplico a ambos lados por D

$$0 = \sum_{i=1}^n x_{Di} \cdot D \cdot (1 - k_i^D)$$

$f(T^D; P^D)$

¡Ahora puedo usar los valores de la tabla! $T^D = 68,5 \text{ } ^\circ\text{C}$



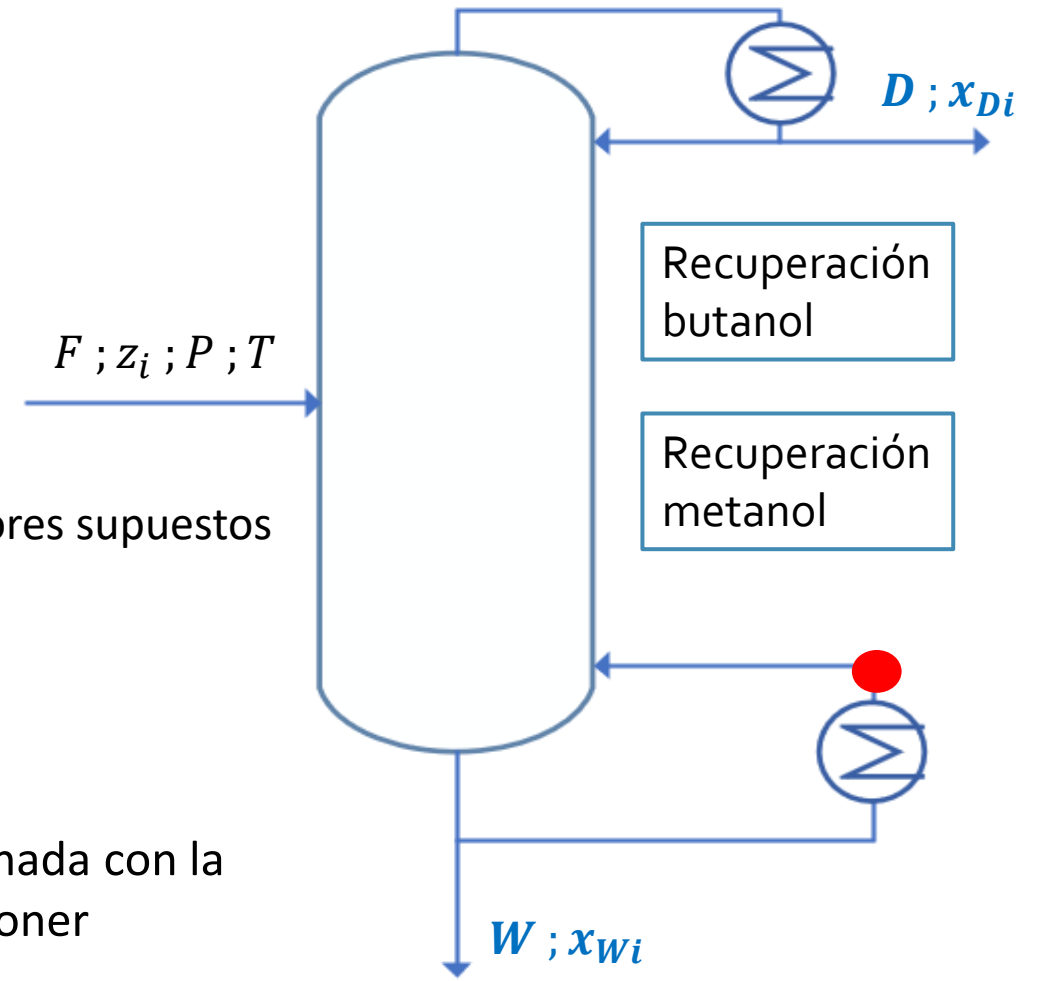
Desarrollo – Temperaturas Extremas

$$0 = \sum_{i=1}^n \frac{z_i^W \cdot (1 - k_i^W)}{1 + \varphi^{\bar{V}} \cdot (k_i^W - 1)}$$

\bar{V} es vapor saturado

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi^{\bar{V}} = 1 \\ z_i^W = x_{wi} \quad \text{Ya tengo los valores supuestos} \\ k_i^W = f(T^W; P^W) \end{array} \right.$$

Si bien no la conozco, está relacionada con la presión de entrada. Se puede suponer entonces que $P^W = P^F + \Delta P_{\text{típico}}$



Desarrollo – Temperaturas Extremas

$$0 = \sum_{i=1}^n \frac{z_i^W \cdot (1 - k_i^W)}{1 + \varphi^{\bar{V}} \cdot (k_i^W - 1)}$$

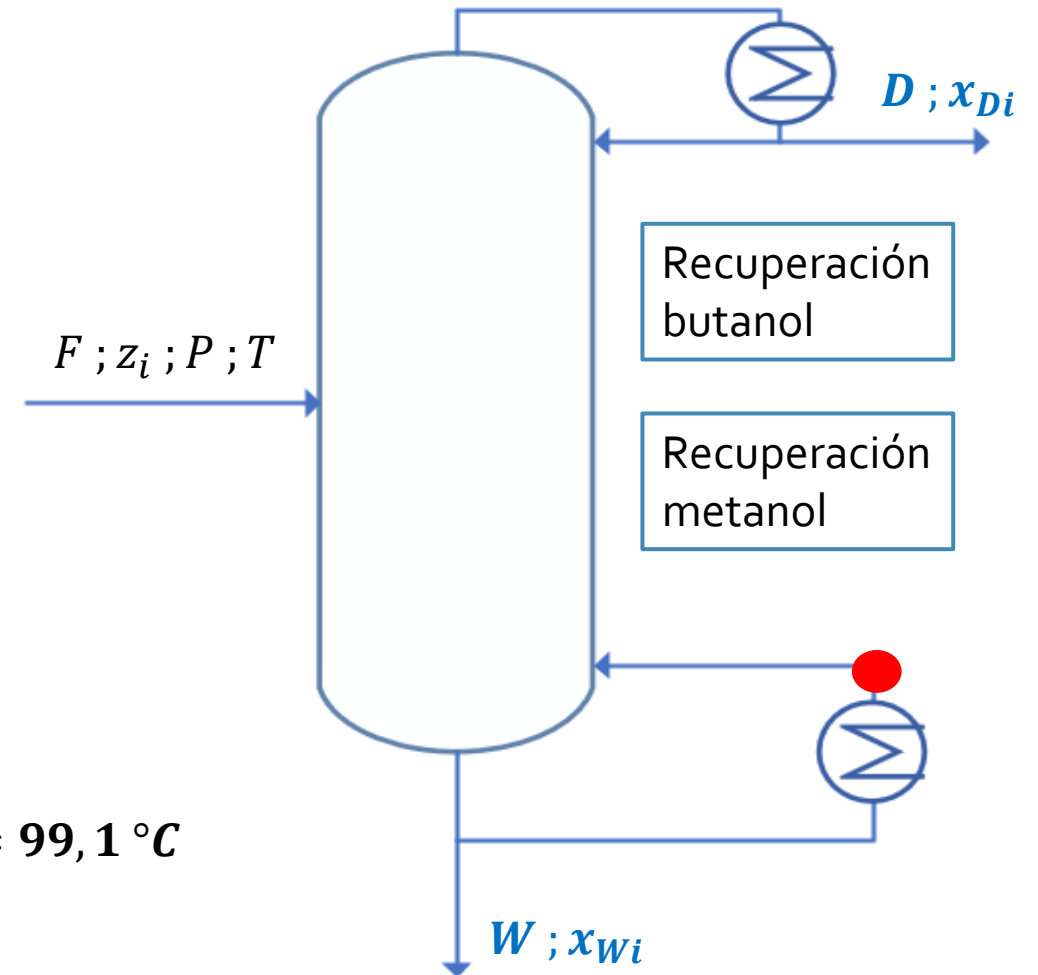
Condición de Fondo

$$0 = \sum_{i=1}^n \frac{x_{Wi} \cdot (1 - k_i^W)}{k_i^W}$$

Multiplico a ambos lados por W

$$0 = \sum_{i=1}^n \frac{x_{Wi} \cdot W (1 - k_i^W)}{k_i^W} \rightarrow f(T^W; P^W)$$

¡Ahora puedo usar los valores de la tabla! $T^W = 99,1 \text{ } ^\circ\text{C}$



Desarrollo – Temperaturas Extremas

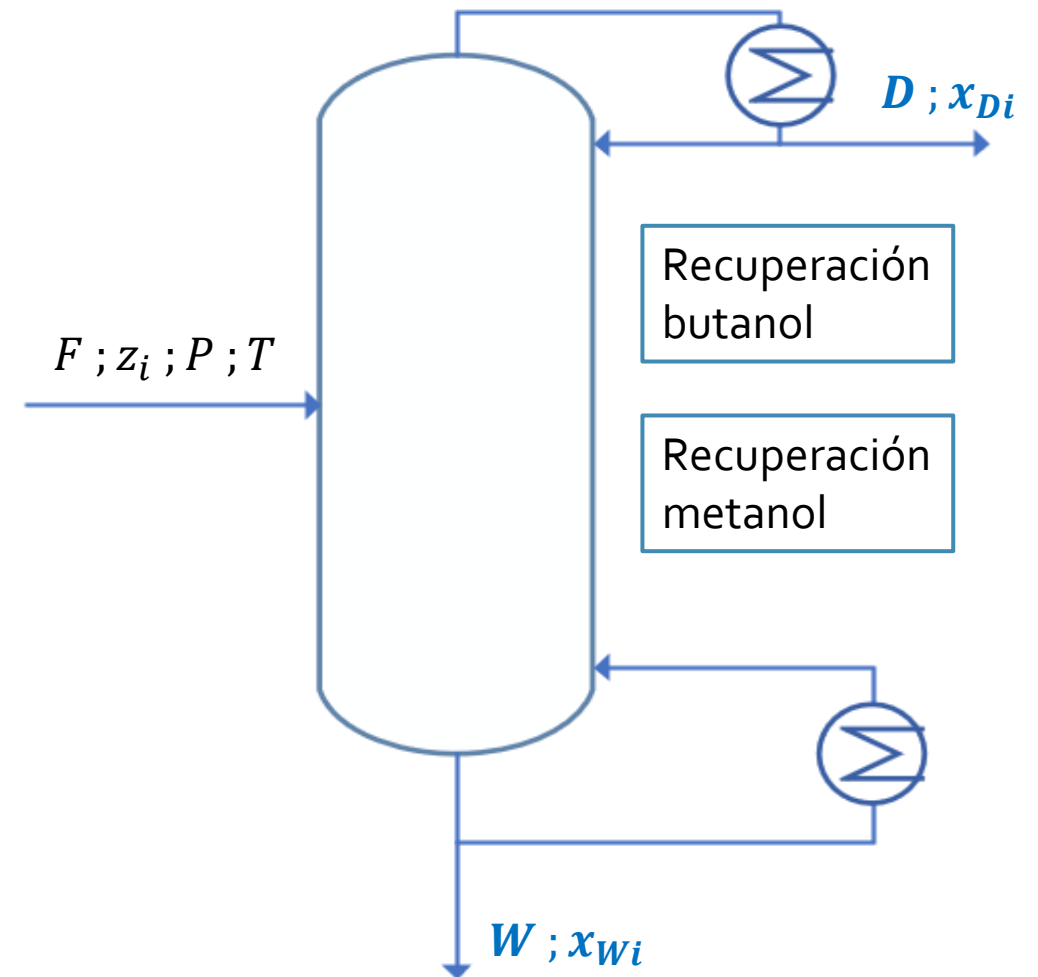
Ahora vamos a verificar los valores que supusimos para cerrar el balance de masa



Cerraremos BM para las condiciones extremas de operación de la torre (N_{min} y R_{min}) y luego vamos a ponderarlas utilizando el valor del reflujo operativo



¿Qué variables vamos a mantener cuando trabajemos en las condiciones extremas?



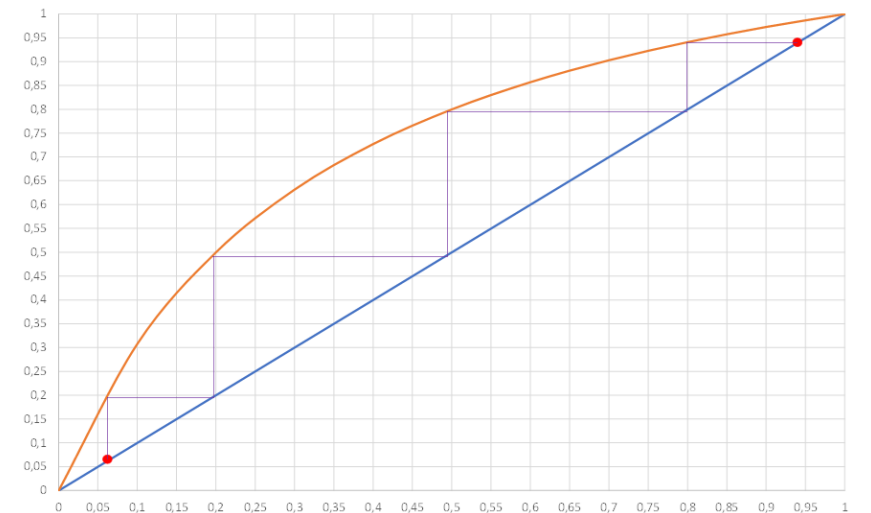
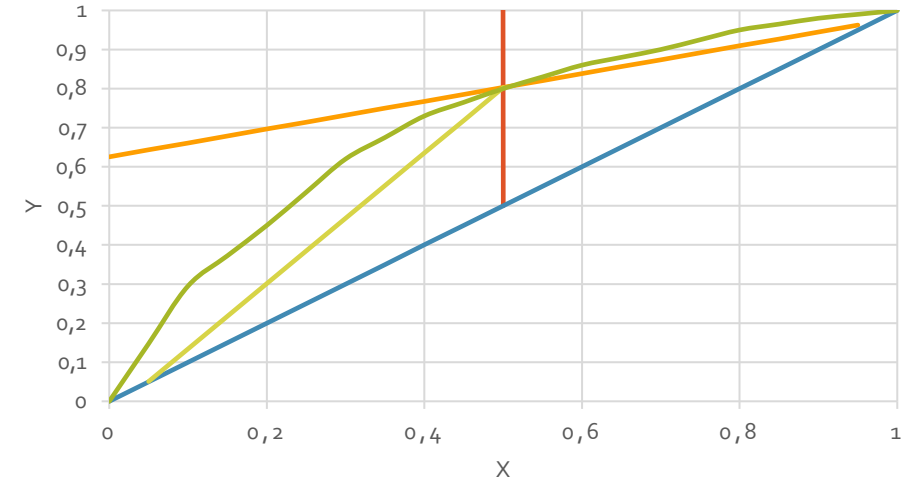
Desarrollo – Condiciones Extremas

¿Qué variables vamos a mantener cuando trabajemos en las condiciones extremas?



Recuperaciones de los compuestos clave

(las únicas recuperaciones afectadas serán las de los compuestos entre - clave)



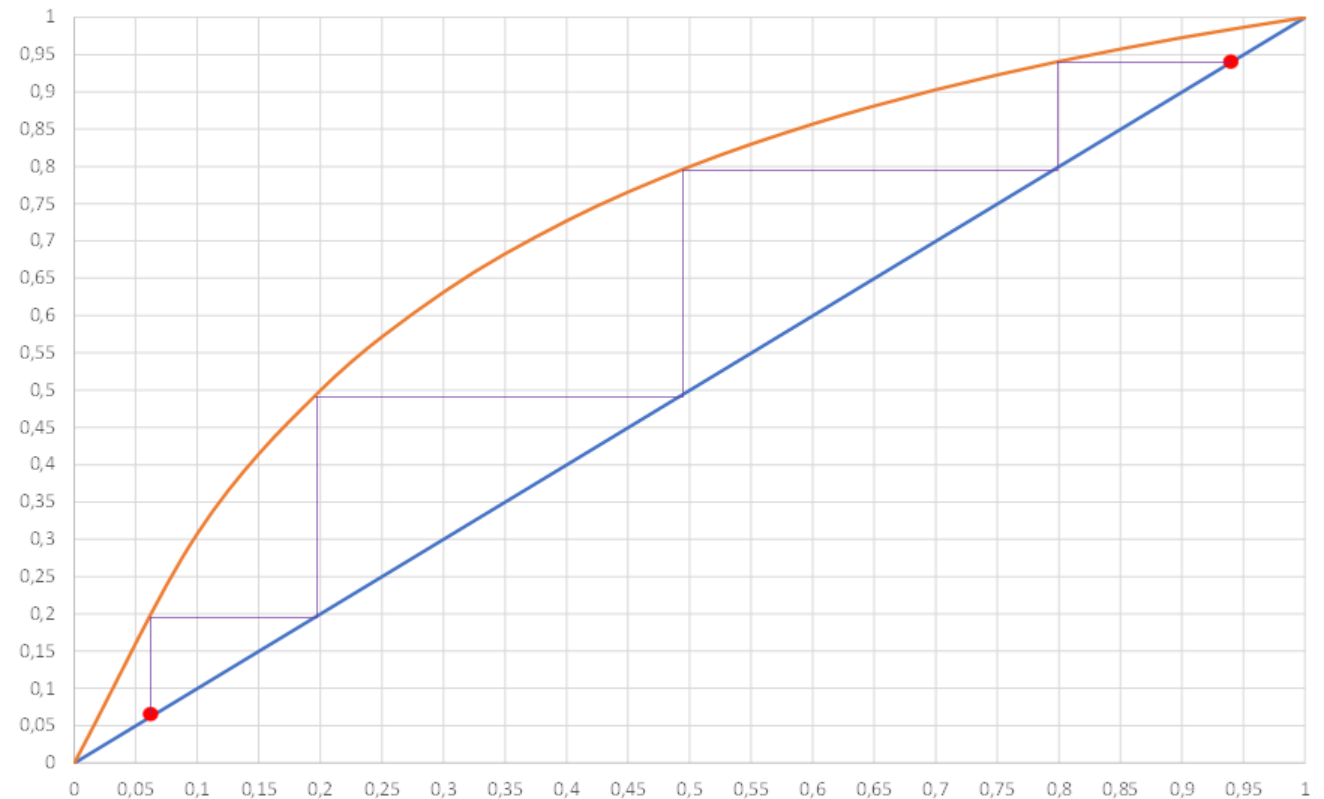
Desarrollo – Nmin - Fenske

$$\frac{x_{Di}}{x_{Dhk}} = \alpha_i^{NP_{min}+1} \cdot \frac{x_{Wi}}{x_{Whk}}$$



$$\alpha_i^j = \frac{k_i^j}{k_{HK}^j}$$

$$\alpha_i = \sqrt[3]{\alpha_i^F \cdot \alpha_i^D \cdot \alpha_i^W}$$



Desarrollo – Nmin - Fenske

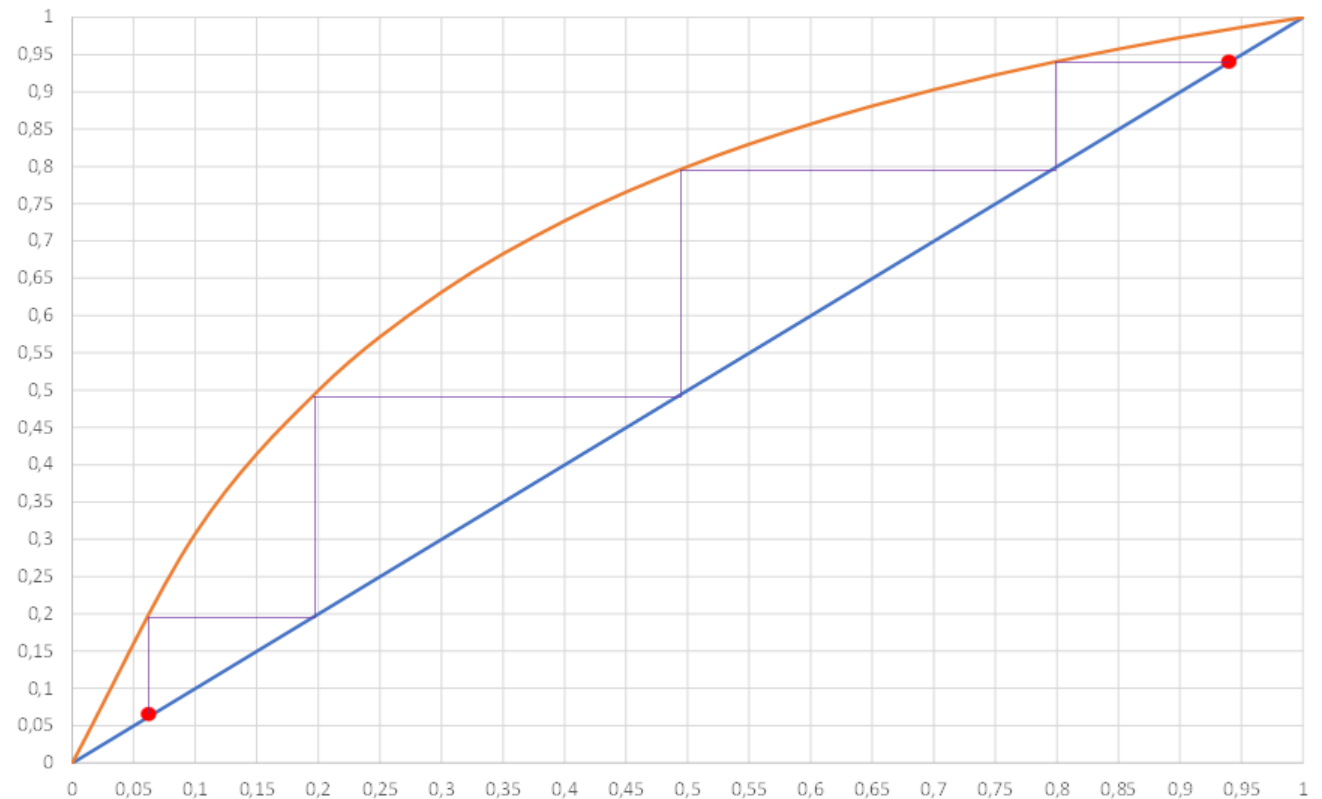
$$\frac{x_{Di}}{x_{Dhk}} = \alpha_i^{NP_{min}+1} \cdot \frac{x_{Wi}}{x_{Whk}}$$

Tomando $i = lk$, nos aseguramos que la única incógnita sea el Np

$$\frac{x_{Dlk}}{x_{Dhk}} = \alpha_i^{NP_{min}+1} \cdot \frac{x_{Wlk}}{x_{Whk}}$$

$$\frac{x_{Dlk} \cdot D}{x_{Dhk} \cdot D} = \alpha_i^{NP_{min}+1} \cdot \frac{x_{Wlk} \cdot W}{x_{Whk} \cdot W}$$

NP_{min}



Desarrollo – Nmin - Fenske

¡Ojo! Fenske no termina acá; tenemos que calcular la recuperación de los componentes entre-clave cuando la torre está operando a reflujo máximo:

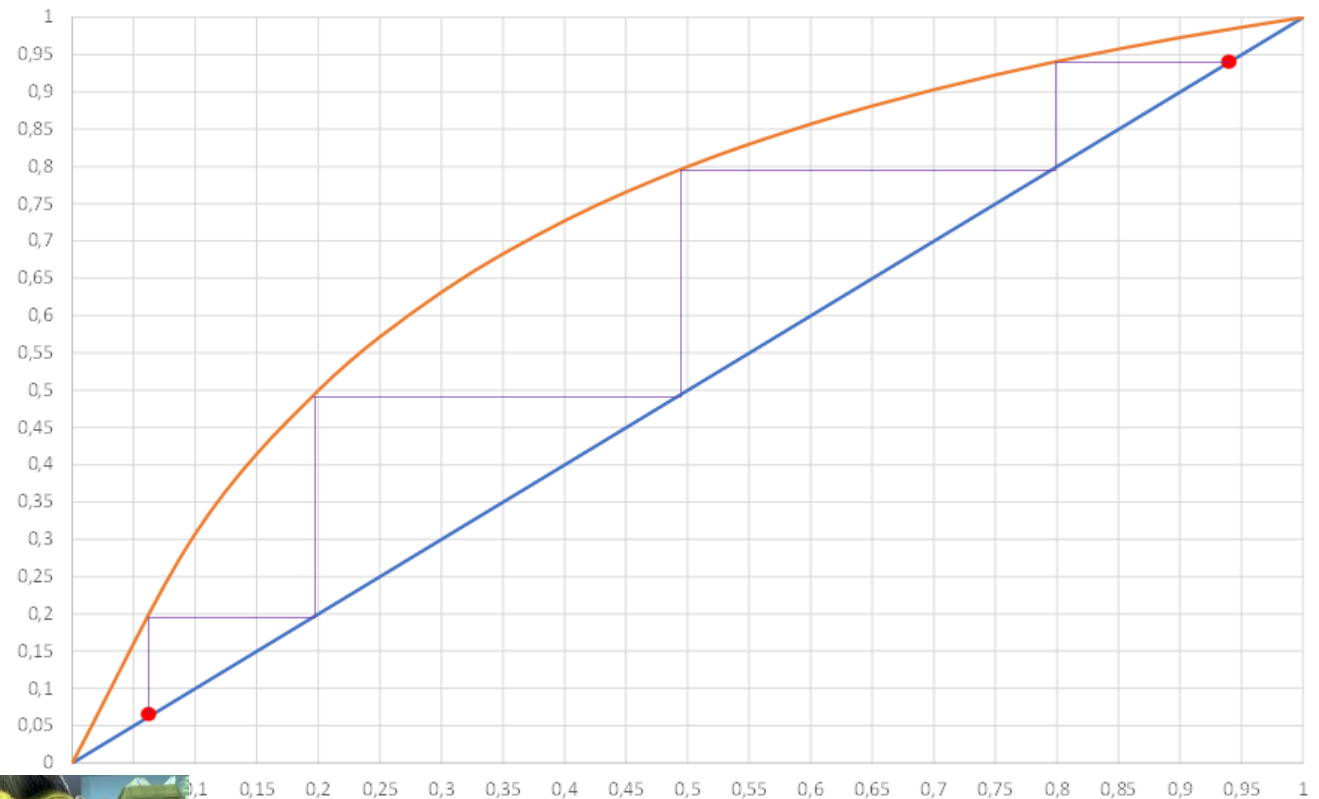
Reemplazamos los i por los componentes entre clave y resolvemos el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\frac{x_{Di} \cdot D}{x_{Dhk} \cdot D} = \alpha_i^{NP_{min}+1} \cdot \frac{x_{Wi} \cdot W}{x_{Whk} \cdot W}$$

$$z_i \cdot F = x_{Di} \cdot D + x_{Wi} \cdot W$$

$$x_{D \text{ etanol}} \cdot D \Big|_{N_{min}}$$

$$x_{D \text{ propanol}} \cdot D \Big|_{N_{min}}$$



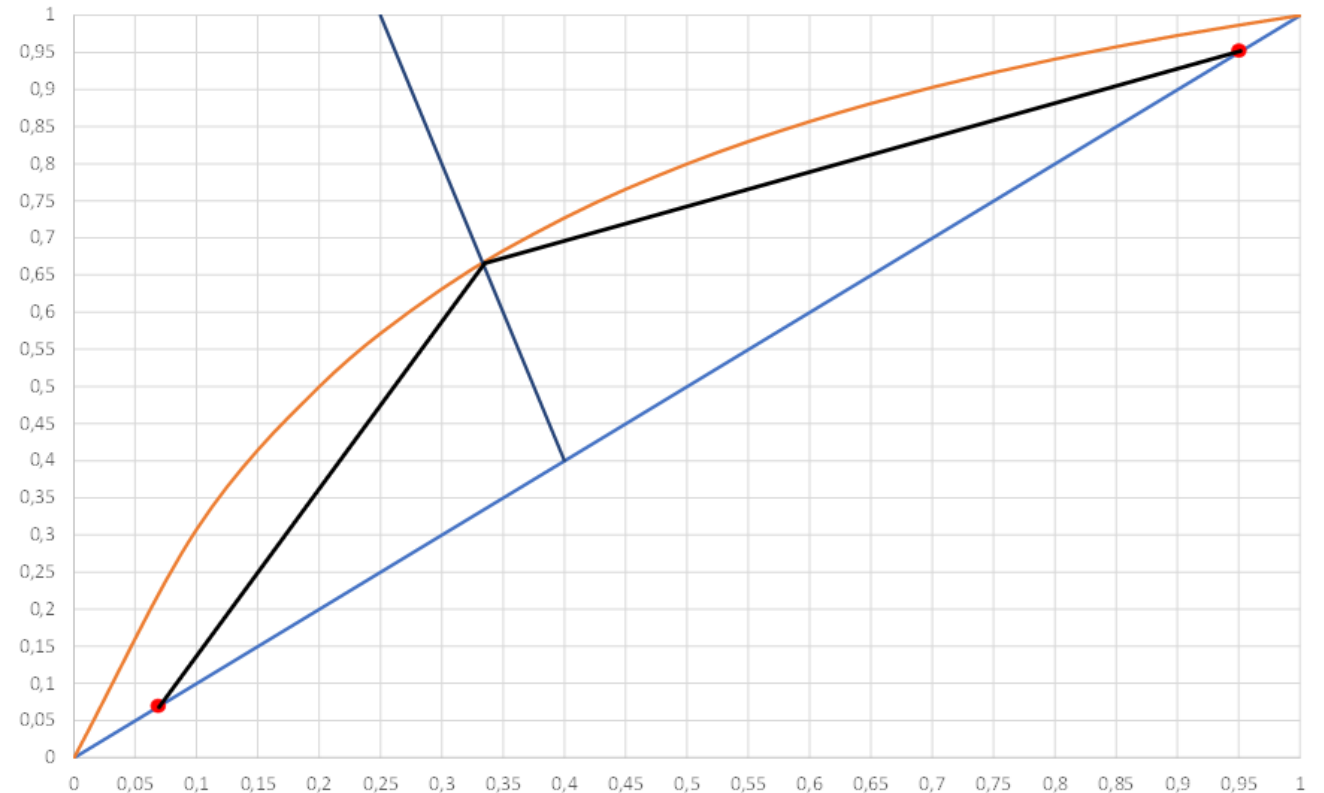
Desarrollo – Rmin - Underwood

$$\sum_1^C \frac{\alpha_i^F \cdot z_i \cdot F}{\alpha_i^F - \Phi_k} = F \cdot \varphi$$

$$\sum_1^{HK} \frac{\alpha_i^D \cdot x_{Di} \cdot D}{\alpha_i^D - \Phi_k} = D \cdot (R_{min} + 1)$$

¿Qué hacemos con estas ecuaciones?

- Obtener los valores correctos de Φ_k de la primera ecuación
- Utilizar esos valores de Φ en la segunda ecuación para obtener las incógnitas



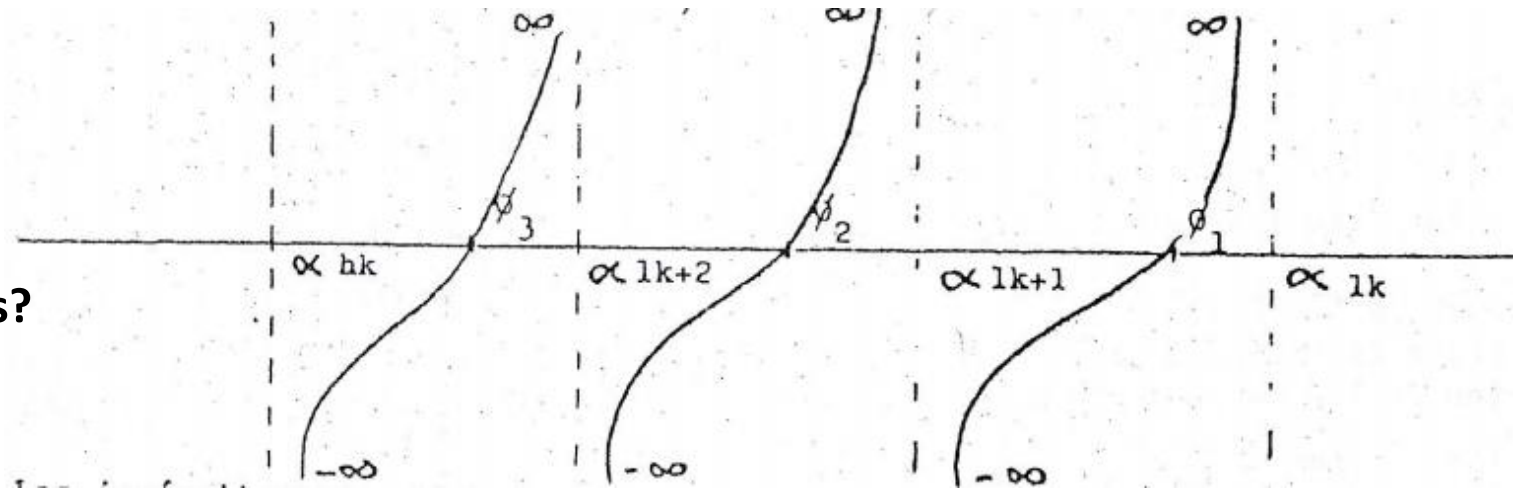
Desarrollo – Rmin - Underwood

$$\sum_1^C \frac{\alpha_i^F \cdot z_i \cdot F}{\alpha_i^F - \Phi_k} = F \cdot \varphi \quad \text{Set (1)}$$

Hay varios valores de Φ que cumplen con esta ecuación (C soluciones)

¿Con cuáles nos quedamos entonces?

Con todos los que estén entre α_{Fhk} (que es igual a 1) y α_{Flk}



Vamos a tener [componentes entre clave + 1]
valores “correctos” de Φ

Desarrollo – Rmin - Underwood

$$\sum_1^{HK} \frac{\alpha_i^D \cdot x_{Di} \cdot D}{\alpha_i^D - \Phi_k} = D \Big|_{R_{min}} \cdot (R_{min} + 1) \quad \text{Set (2)}$$

Tengo [Componentes entre clave + 2] incógnitas

¿Qué **no** conocemos de esta ecuación?

$D \Big|_{R_{min}}$

R_{min}

$x_{Di} \cdot D$ de cada componente entre clave

Planteamos:

Set (2) con cada Φ_k obtenido de Set (1):
[Componentes entre clave + 1]

$$+ \sum_1^{HK} x_{Di} \cdot D = D$$

[Componentes entre clave + 2] ecuaciones



$$\begin{array}{l} R_{min} \\ x_{D \text{ etanol}} \cdot D \Big|_{R_{min}} \\ x_{D \text{ propanol}} \cdot D \Big|_{R_{min}} \end{array}$$

Desarrollo – Interpolación

¿Qué obtenemos de las condiciones máximas?

Fenske

$$N_{min}$$

$$x_{D \text{ etanol}} \cdot D \Big|_{N_{min}}$$

$$x_{D \text{ propanol}} \cdot D \Big|_{N_{min}}$$

Underwood

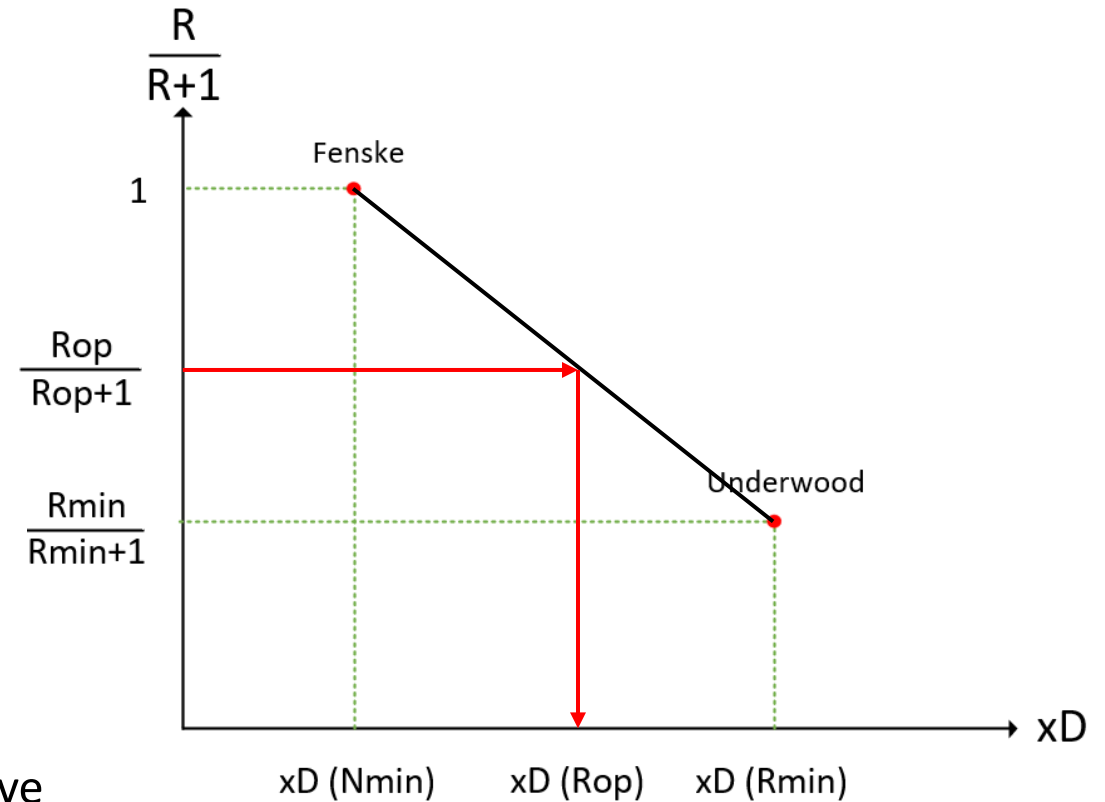
$$R_{min}$$

$$x_{D \text{ etanol}} \cdot D \Big|_{R_{min}}$$

$$x_{D \text{ propanol}} \cdot D \Big|_{R_{min}}$$

Para la condición de operación normal, interpolamos los datos obtenidos con un gráfico de $\frac{R}{R+1}$ vs x_{Di}

Debemos hacer un gráfico para cada compuesto entre-clave



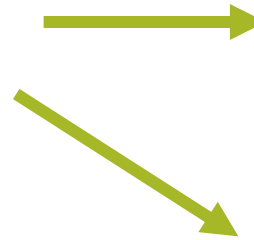
$$x_{D \text{ etanol}} \Big|_{R_{op}}$$

$$x_{D \text{ propanol}} \Big|_{R_{op}}$$

Desarrollo – Cierre del BM

$$x_{D \text{ etanol}} \Big|_{Rop}$$
$$x_{D \text{ propanol}} \Big|_{Rop}$$

Tenemos que comparar estos valores con los propuestos al comienzo



Si son iguales → GANAMOS
(cerramos el BM con éxito)

Si son distintos, los tomamos como semilla para realizar el procedimiento otra vez



Cálculo de:

- Temperaturas extremas
- Número de platos mínimos
- Reflujo mínimo
- Interpolación

	[kmol/h] @Rop		
	zi(F)*F	xi(D)*D	xi(W)*W
Metanol	500	450	50
Etanol	200	102,44	97,56
Propanol	200	53,72	146,28
Butanol	100	5	95
Total	1000	611,16	388,84

Desarrollo – Shiras

El método de Shiras permite identificar si fuimos consistentes con las cuentas que hicimos; nos permite verificar que elegimos correctamente los compuestos entre - clave

$$\frac{x_{Di} \cdot D}{z_i \cdot F_{Rmin}} = \frac{\alpha_i - 1}{\alpha_{lk} - 1} \cdot \frac{x_{Dlk} \cdot D}{z_{lk} \cdot F} + \frac{\alpha_{lk} - \alpha_i}{\alpha_{lk} - 1} \cdot \frac{x_{Dhk} \cdot D}{z_{hk} \cdot F}$$

Calculamos el factor $\frac{x_{Di} \cdot D}{z_i \cdot F_{Rmin}}$ para todos los compuestos de la mezcla



Si el factor da entre 0,01 y 0,99 → el compuesto distribuye



Desarrollo – N total y N alimentación

Con el BM cerrado, vamos a calcular cuántos platos necesitamos y dónde conviene ubicar la alimentación

Cantidad de platos



$$Y = 0,75 \cdot (1 - X^{0,5668}) \quad \text{Eduljee}$$

$$Y = 1 - e^{\left[\left(\frac{1+54,4 \cdot X}{11+117,2 \cdot X} \right) \cdot \left(\frac{X-1}{X^{0,5}} \right) \right]} \quad \text{Molokanov}$$

$$Y = \frac{N - N_{min}}{N + 1} \quad X = \frac{R - R_{min}}{R + 1}$$

Plato de alimentación



$$\frac{N_{rectif.}}{N_{agot.}} = \left[\left(\frac{z_{HK F}}{z_{LK F}} \right) \cdot \left(\frac{x_{LK W}}{x_{HK D}} \right)^2 \cdot \left(\frac{W}{D} \right) \right]^{0,206} \quad \text{Kirkbride}$$

$$N_{rectificación} + N_{agotamiento} = N$$



¿PREGUNTAS?