



Departamento de
Engenharia Química
Escola Politécnica da
USP

PQI0410 - Operações Unitárias da Indústria Química V

AULAS 2: Equilíbrio e fatores de
separação

Prof. Moisés Teles/ Msc. Juliana Jesus (Programa de Aperfeiçoamento de Ensino)

moises.teles@usp.br



OBJETIVOS

- 1) Definir estágio de equilíbrio;
- 2) Identificar as principais formas de promover a TM de espécies químicas entre diferentes fases;
- 3) Identificar as principais formas de operação em múltiplos estágios de equilíbrio.
- 4) Calcular os principais parâmetros de desempenho em processos de separação industrial;

INTRODUÇÃO

Parâmetros de desempenho

1. Recuperação do componente i (ou *split fraction*):

$$R_i = \frac{Lx_i}{Fz_i}$$

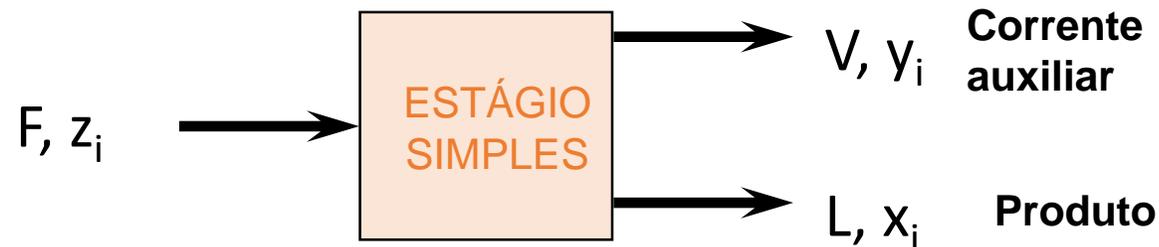
Vazão de componente i na corrente de produto
Vazão de componente i na alimentação

2. Razão de separação do componente i (ou *split ratio*):

$$SR_i = \frac{Vy_i}{Lx_i}$$

Vazão de componente i na corrente auxiliar
Vazão de componente i no produto

$SR_i > 1$ componente se move para a fase auxiliar V
 $SR_i < 1$ componente se move para a fase principal L



INTRODUÇÃO

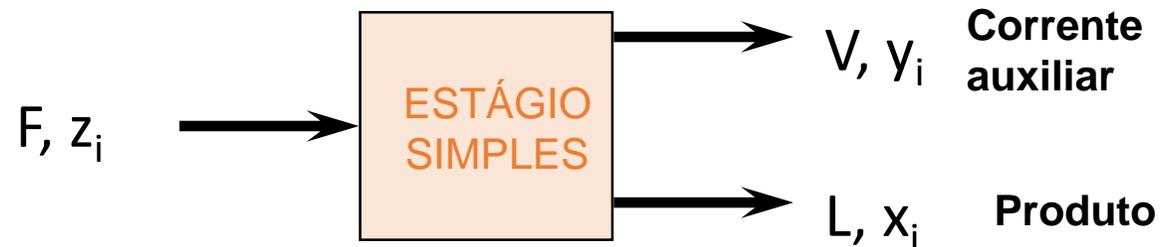
Parâmetros de desempenho

1. Fator de separação (SP) entre os componentes i e j

$$SP_{i,j} = \frac{y_i / y_j}{x_i / x_j} \quad \text{por convenção } SP > 1$$

2. Pureza do produto (P):

$$P = x_i \quad \text{Fração mássica (ou molar) do componente i no produto}$$



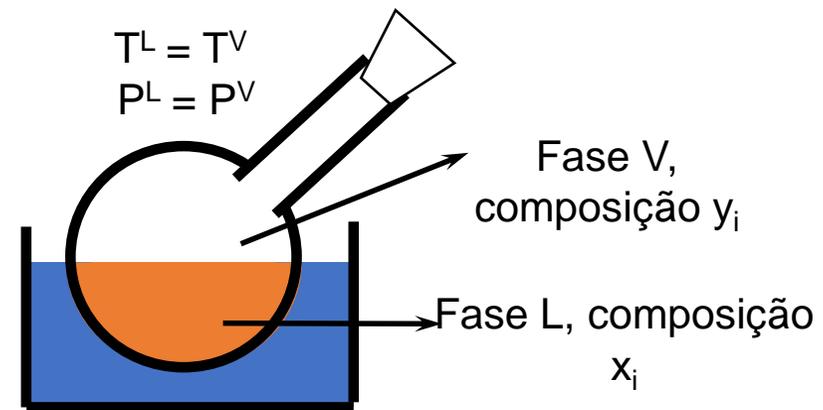
INTRODUÇÃO

1. Se tempo de contato é longo no separador → estágio de equilíbrio, i.e. fases V e L estão em equilíbrio. Definimos:

- coeficiente de distribuição (usado para sistemas L-L e L-S) ou “valor K” (G-L)

$$K_i \equiv \frac{y_i}{x_i}$$

Definição de K



- Volatilidade relativa (sistemas G-L) ou seletividade relativa (sistemas L-L):

$$\alpha_{ij} \equiv \frac{K_i}{K_j}$$

K 's são determinados a partir de modelos termodinâmicos ou diagramas de fases

INTRODUÇÃO

- K e alpha se relacionam com os índices de desempenho:

$$SR_i = \frac{V y_i}{L x_i} = K_i \frac{V}{L}$$

$$SR_i = S_i$$

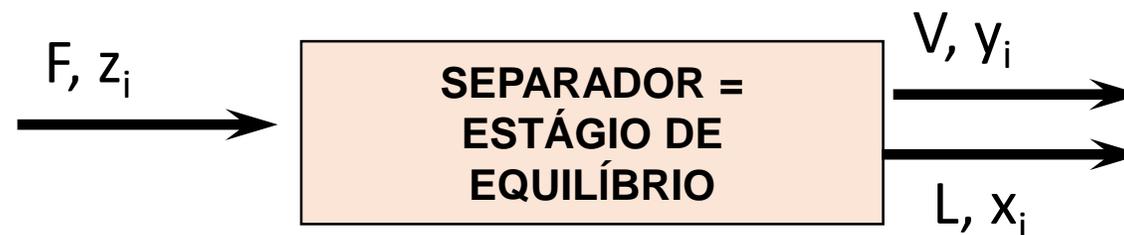
Fator de absorção
Fator de *stripping*

$$SP_{i,j} = \frac{y_i / y_j}{x_i / x_j} = \frac{K_i}{K_j} = \alpha_{i,j}$$

$$SP_{i,j} = \alpha_{i,j}$$

Volatilidade relativa (destilação)
seletividade relativa (extração)

- Logo, se separador opera como estágio de equilíbrio o rendimento SR_i e o fator de separação $SP_{i,j}$ podem ser determinados usando modelos termodinâmicos.





INTRODUÇÃO

- Papel de processos de separação na indústria química:
 - Processar materiais que ocorrem na natureza, matéria animal ou vegetal, intermediários químicos ou resíduos
 - Recuperar um componente **ou** purificar uma corrente
- Seleção de processos baseada em diferenças de propriedades dos componentes
- Tipos de processos:
 - Criação de fase, adição de fase, barreira sólida, campo de força
- Análise de processos: recuperação, pureza e fator de separação
- Se separador é estágio de equilíbrio, os índices de processo se relacionam com quantidades obtidas da termodinâmica: coeficiente de distribuição (K) e seletividade relativa (α)

INTRODUÇÃO

TM em processo de separação

- ❑ Em processos de separação, energia, trabalho ou uma fase auxiliar são adicionados ao sistema para gerar um sistema bifásico **fora do equilíbrio**;
- ❑ TM ocorre entre as fases visando **restabelecer o equilíbrio**;
 - Normalmente, equilíbrio significa separação apenas parcial.

- ❑ Quando a taxa de transporte é lenta, ela determina



- o tempo de contato necessário para atingir uma tarefa de separação:
Importante para projeto, pois tempo determina tamanho do equipamento.
- a extensão de separação possível no tempo de contato disponível:
Importante para melhoria de equipamentos existentes (tempo invariável).

INTRODUÇÃO

Neste modelo a força motriz para o fluxo é o afastamento do equilíbrio termodinâmico.

1. Conhecidos: vazões molares L e V , frações molares na entrada x_0 e y_2 ;
2. Balanço de massa em torno da fase auxiliar para o componente :

$$Vy_2 + NA = Vy_1 \quad (1)$$

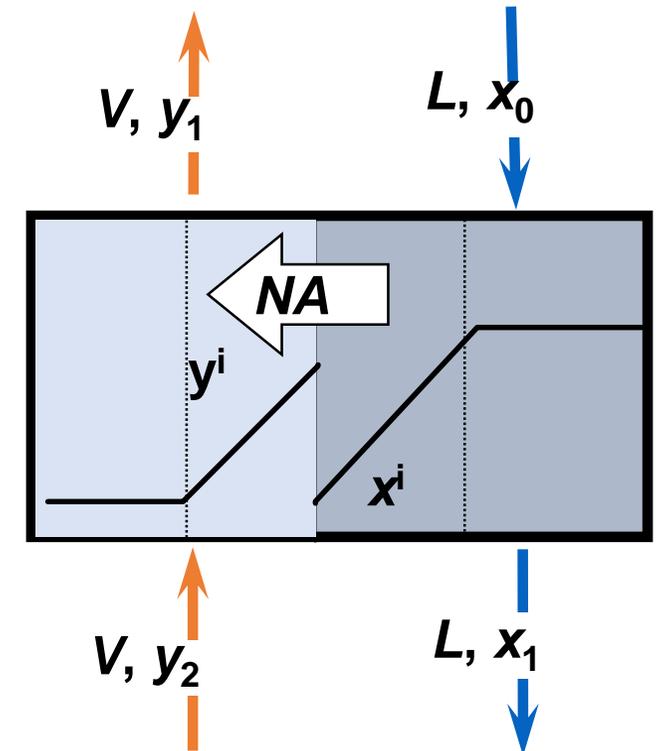
3. Balanço de massa no estágio para o componente:

$$Vy_2 + Lx_0 = Vy_1 + Lx_1 \quad (2)$$

4. Correntes na saída em equilíbrio

$$y_1 = K x_1 \quad (3)$$

5. O TM se dá até o equilíbrio por hipótese, ele independe de superfície de troca, coeficiente de troca, etc. O valor de N_A (a vazão de componente transportada) é obtido da **equação 1**.



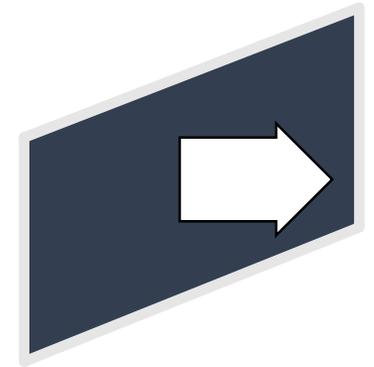
3 equações
3 variáveis
(em verde)



RESUMO

1. Num separador, massa é transportada dentro de uma fase em direção à interface.

- Fluxo é ortogonal à interface
- Fluxo tem componentes **difusivo** e **convectivo**. $N_A = J_A + x_A N$
- Para escoamento unimolecular $\rightarrow N_A = J_A$
- Em soluções diluídas a convecção pode ser desprezada

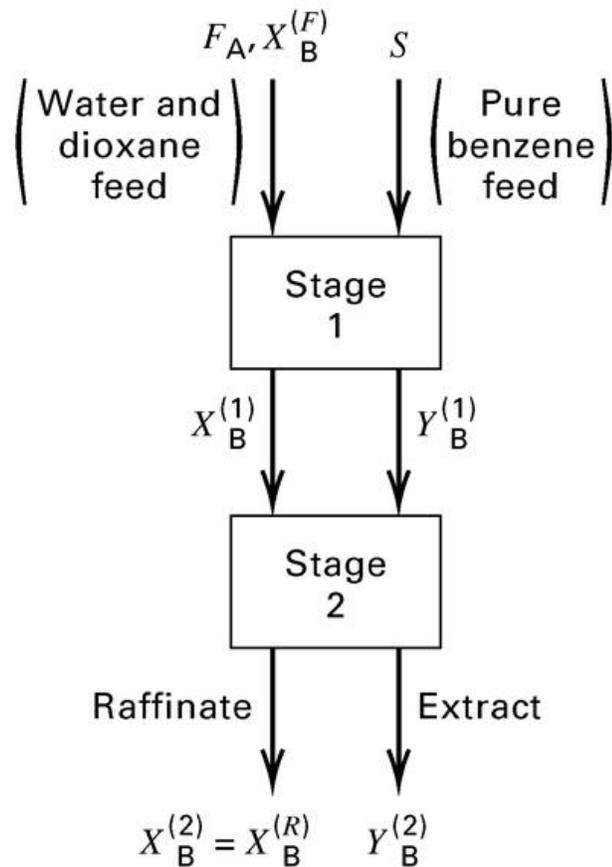


2. A vazão de componente transportado é obtida a partir do fluxo e da superfície.

INTRODUÇÃO

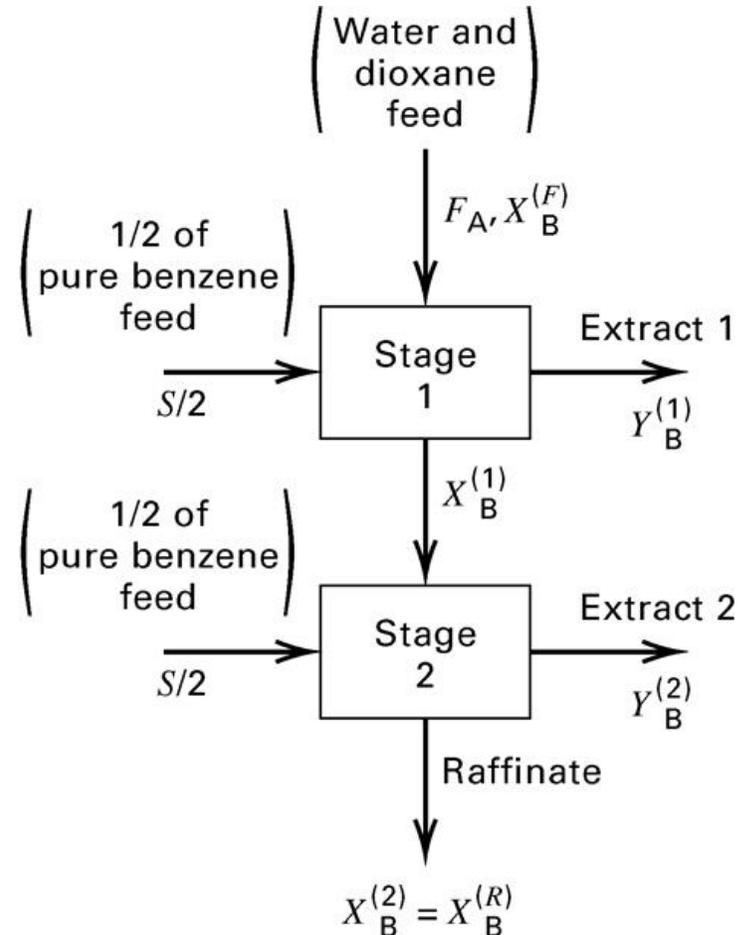
Operações em cascata

CONCORRENTE



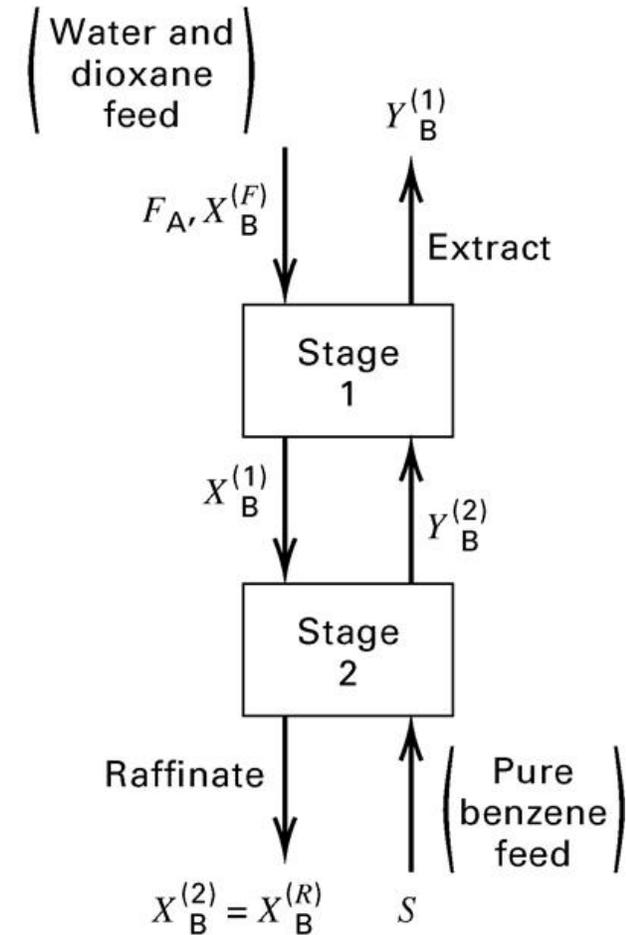
(a)

CORRENTES CRUZADAS



(b)

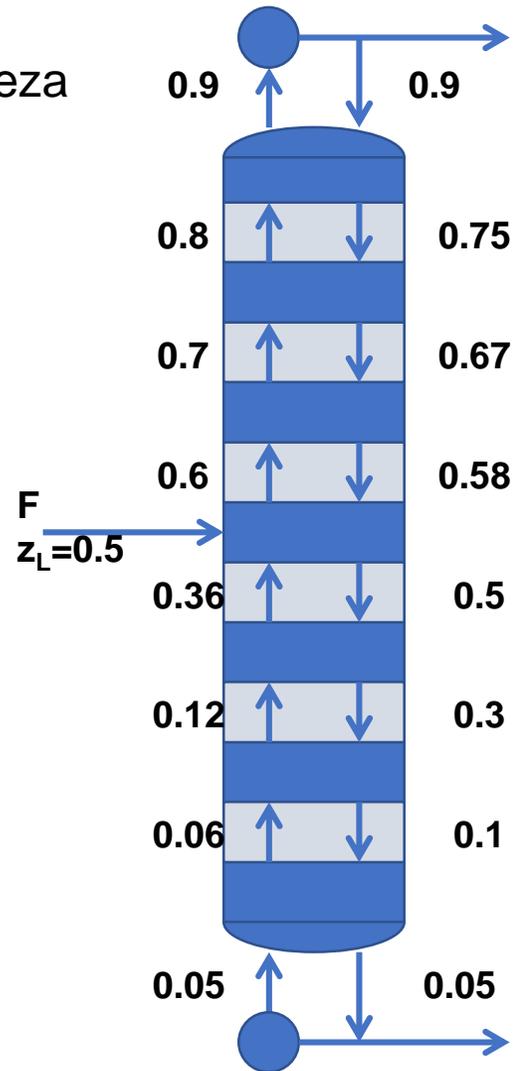
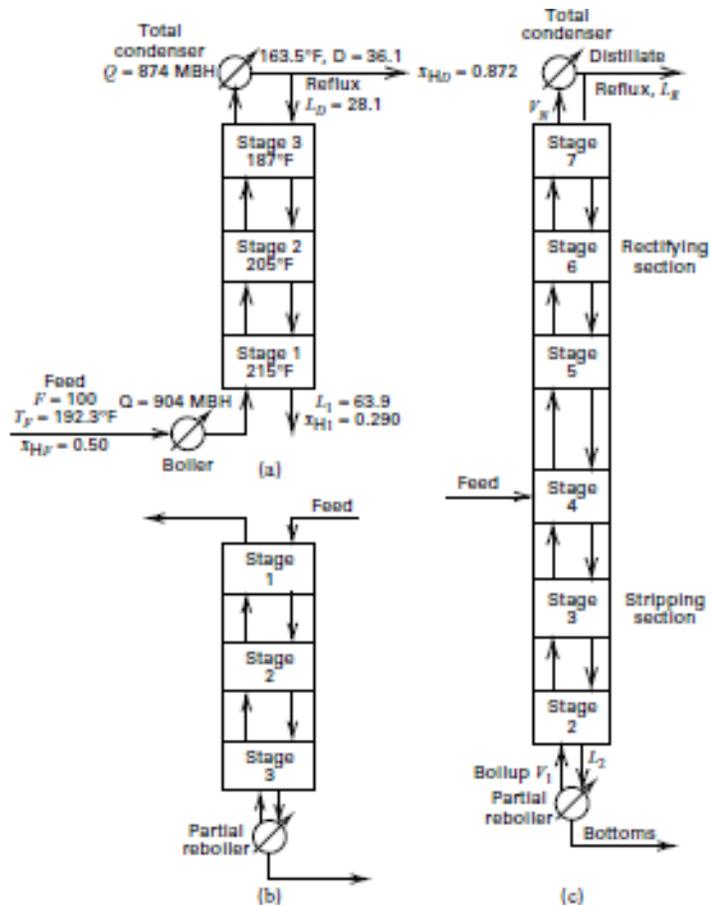
CONTRACORRENTE



(c)

INTRODUÇÃO

- Cascatas com duas seções
 - Permitem obter duas correntes com alta pureza
 - Usadas em destilação





RESUMO

1. Estágios de equilíbrio são aproximações úteis de estágios de contato reais (TM não precisa ser levada em conta).
2. Em geral são usados diversos estágios de contato: contracorrente é mais eficiente que corrente cruzada.
3. O desempenho de cada estágio é determinado por valores de K . Por isso precisamos de dados de equilíbrio.
 - volatilidade relativa constante (análise preliminar)
 - propriedades de substâncias puras (L e V ideais),
 - coeficientes de atividade e equações de estado (L e V reais)