

Absorção & Regeneração

Prof. Rodolfo Rodrigues
Universidade Federal do Pampa

BA310 – Operações Unitárias II
Curso de Engenharia Química
Campus Bagé

10 de setembro de 2018



Introdução



Introdução

Absorção & Regeneração

- A **absorção gasosa** separa 2 componentes de uma **mistura gasosa** por contato com um **solvente** líquido não-volátil (agente de absorção);
- Um dos componentes é preferencialmente dissolvido no solvente;
- É usada para separar os componentes de um gás, remover impurezas, contaminantes ou poluentes, recuperar produtos químicos valiosos, etc.



Introdução

Absorção & Regeneração

- Quanto a reatividade entre solvente e soluto, temos: **absorção física** e **absorção química** ou **reativa** (reversível e irreversível);
- A **regeneração** é a operação inversa da absorção e é utilizada geralmente para **recuperar o solvente** usado na absorção gasosa.



Introdução

Tabela 1: Operações de absorção gasosa comerciais representativas.

Solute	Absorbent	Type of Absorption
Acetone	Water	Physical
Acrylonitrile	Water	Physical
Ammonia	Water	Physical
Ethanol	Water	Physical
Formaldehyde	Water	Physical
Hydrochloric acid	Water	Physical
Hydrofluoric acid	Water	Physical
Sulfur dioxide	Water	Physical
Sulfur trioxide	Water	Physical
Benzene and toluene	Hydrocarbon oil	Physical
Butadiene	Hydrocarbon oil	Physical
Butanes and propane	Hydrocarbon oil	Physical
Naphthalene	Hydrocarbon oil	Physical
Carbon dioxide	Aq. NaOH	Irreversible chemical
Hydrochloric acid	Aq. NaOH	Irreversible chemical
Hydrocyanic acid	Aq. NaOH	Irreversible chemical
Hydrofluoric acid	Aq. NaOH	Irreversible chemical
Hydrogen sulfide	Aq. NaOH	Irreversible chemical
Chlorine	Water	Reversible chemical
Carbon monoxide	Aq. cuprous ammonium salts	Reversible chemical
CO ₂ and H ₂ S	Aq. monoethanolamine (MEA) or diethanolamine (DEA)	Reversible chemical
CO ₂ and H ₂ S	Diethyleneglycol (DEG) or triethyleneglycol (TEG)	Reversible chemical
Nitrogen oxides	Water	Reversible chemical

Fonte: Henley, Seader & Roper (2011).



Introdução

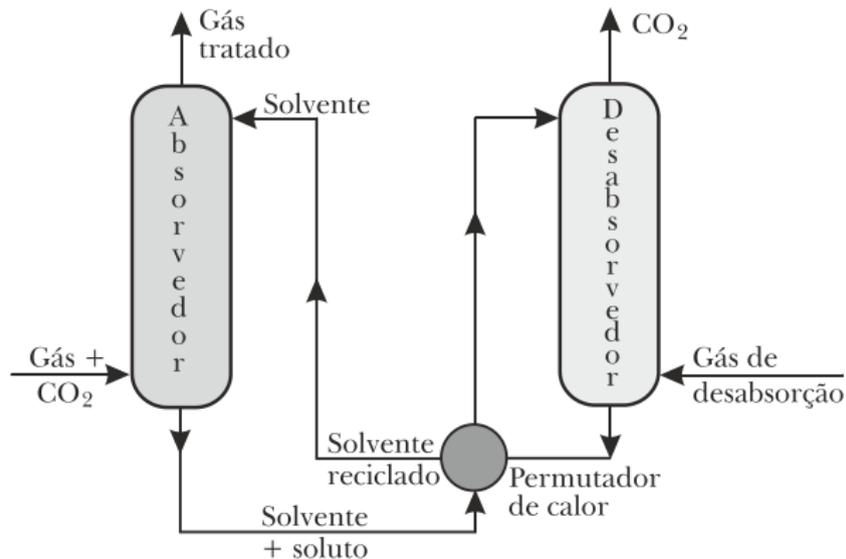


Figura 1: Representação das operações de **absorção** e de **regeneração** (desabsorção). Neste exemplo, CO_2 contido em um efluente gasoso é absorvido por uma amina sendo este solvente posteriormente regenerado por vapor d'água e reciclado.

Fonte: Azevedo & Alves (2013).

Introdução

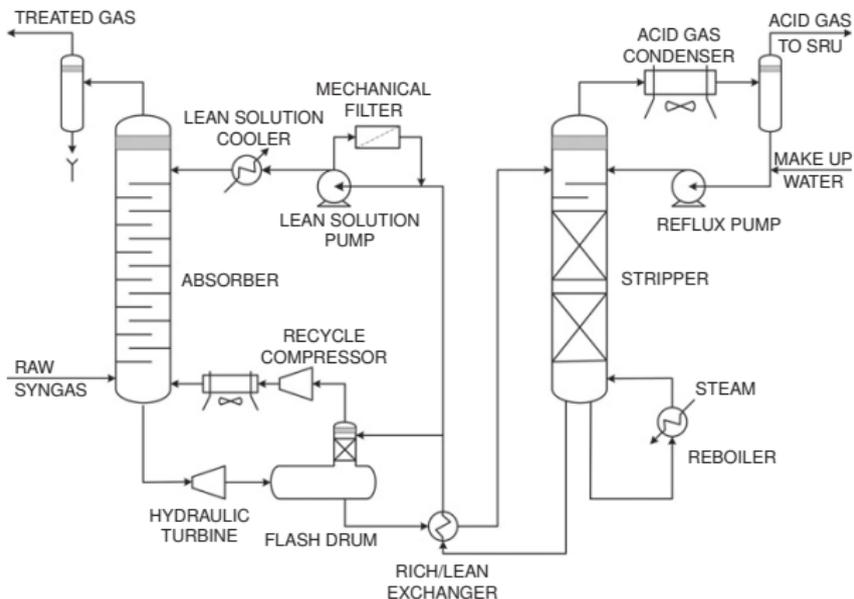


Figura 2: Fluxograma do **processo Selexol** para remoção seletiva de H_2S . Tecnologia AGR (*Acid Gas Removal*). Característica: agente absorvente DMPEG (dimetiléter de polietilenoglicol) e 99+% de remoção de S.

Fonte: HIGMAN, C.; van der BURGT, M. *Gasification*. 2. ed. Burlington: Gulf Professional Publishing, 2008.

Introdução

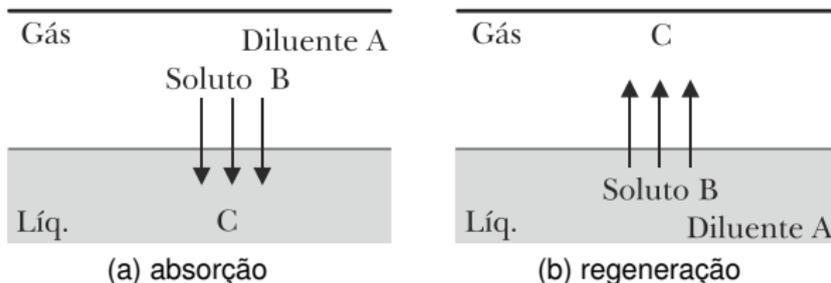


Figura 3: (a) Na absorção, o soluto B está no gás e o diluyente A (gás transportador) é insolúvel no solvente C. (b) Na regeneração (*stripping*), o soluto B está no líquido e o diluyente A é não-volátil.

Fonte: Azevedo & Alves (2013).

Introdução

Seleção de Solventes

- **Capacidade:** Solubilidade do soluto no solvente. Se for elevada, é menor a vazão de solvente necessária.
- **Seletividade:** Solvente deve dissolver apenas o(s) componente(s) da corrente gasosa.
- **Volatilidade:** Pressão de vapor tão baixa quanto possível para minimizar perdas do solvente para a corrente gasosa.
- **Corrosibilidade:** Não corrosivo, para evitar materiais de construção especiais e caros.



Introdução

Seleção de Solventes

- **Custo:** Pouco dispendioso, para minimizar os custos pelas eventuais perdas.
- **Viscosidade:** Pouco viscoso para favorecer altos coef. de transf., melhores condições de inundação e transporte.
- Não tóxico e não inflamável, quimicamente estável, baixo ponto de fusão e facilmente recuperável por regeneração.



Introdução

Equilíbrio de Fases

- Para soluções diluídas (< 1%), usa-se a **lei de Henry**:

$$p_B = x_B H_B \quad (1)$$

onde H_B é a constante de Henry.

- Pela **lei de Dalton**, pode-se escrever:

$$y_B = \frac{p_B}{p} = \frac{H_B}{p} x_B \quad (2)$$



Número de Estágios de Equilíbrio



Número de Estágios de Equilíbrio

Determinação do Número de Estágios

- 1 Método Gráfico:** Diagrama de McCabe-Thiele
- 2 Método Analítico:** Equações de Kremser



Método Gráfico de McCabe-Thiele

Para a **absorção gasosa** assumem-se:

- Entalpia de absorção é desprezível;
- **Solvente líquido é não-volátil;**
- Coluna é isotérmica e isobárica;
- **Gás diluente é insolúvel no solvente.**

Há 2 tipos de soluções envolvidas:

- **Soluções diluídas** ($< 1\%$);
- **Soluções concentradas.**



Método Gráfico de McCabe-Thiele

Soluções Diluídas × Soluções Concentradas

- **Fração** (x, y) e **razão** (X, Y) molares:

$$X = \frac{\text{moles de soluto no líquido}}{\text{moles de solvente líquido puro}} = \frac{x}{1 - x} \quad (3)$$

$$Y = \frac{\text{moles de soluto no gás}}{\text{moles de gás diluente isento de soluto}} = \frac{y}{1 - y} \quad (4)$$

- **Vazões totais** (G, L) e **isentas de soluto** (G_s, L_s):

$$G_s = (1 - y)G \quad (5)$$

$$L_s = (1 - x)L \quad (6)$$

Método Gráfico de McCabe-Thiele

Soluções Diluídas × Soluções Concentradas

- Frações molares: $0 \leq x \leq 1$ e $0 \leq y \leq 1$;
- Razões molares: $0 \leq X \leq \infty$ e $0 \leq Y \leq \infty$;
- Para soluções diluídas: $X \approx x$ e $Y \approx y$.



Método Gráfico de McCabe-Thiele

Linhas de Operação

- **Absorção/Regeneração:**

$$Y_{j+1} = \left(\frac{L_S}{G_S}\right) X_j + \left(Y_1 - \frac{L_S}{G_S} X_0\right) \quad (7)$$

- Para a **absorção** a linha de operação está **acima** da linha (ou curva) de equilíbrio;
- Para a **regeneração** a linha de operação está **abaixo** da linha (ou curva) de equilíbrio.



Método Gráfico de McCabe-Thiele

Passo-a-passo do Método Gráfico

- 1** Representar os dados de equilíbrio líquido-vapor, Y em função de X ;
- 2** Marcar as coordenadas conhecidas, geralmente X_0 , Y_{N+1} e Y_1 para a absorção;
- 3** Traçar a linha de operação com inclinação L_s/G_s a partir de 2 pontos: topo (X_0 , Y_1) e fundo (Y_{N+1} , X_N).
Sendo que X_N é determinado por:

$$\frac{L_s}{G_s} = \frac{Y_{N+1} - Y_1}{X_N - X_0} \quad (8)$$

pa

Método Gráfico de McCabe-Thiele

Passo-a-passo do Método Gráfico

- 4 A partir do topo (X_0, Y_1), traçar os degraus no espaço entre as linhas de operação e de equilíbrio;
- 5 Na linha de equilíbrio, contar o número de estágios de equilíbrio.



Absorção & Regeneração

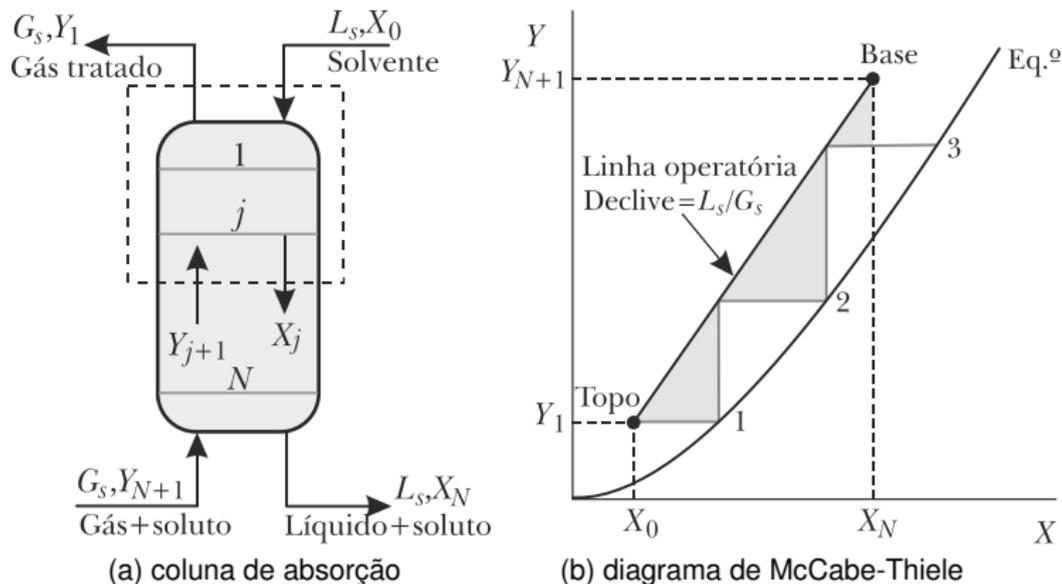


Figura 4: (a) Representação esquemática de uma coluna de absorção gasosa (ou absorvedor de gases). (b) Construção do diagrama de McCabe-Thiele.

Fonte: Azevedo & Alves (2013).

Absorção & Regeneração

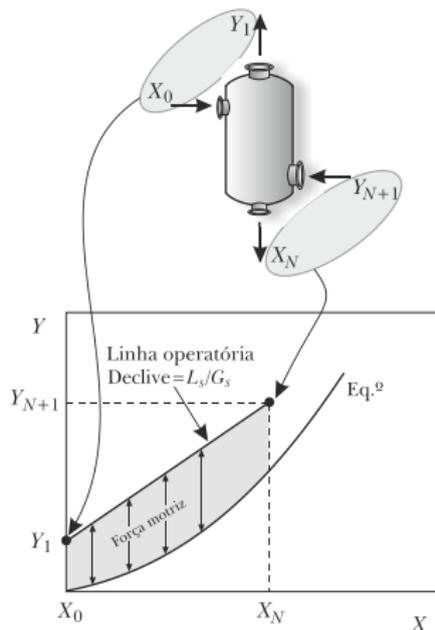
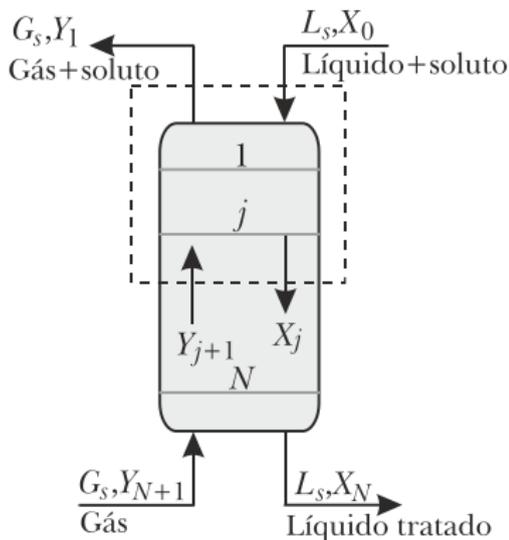


Figura 5: Na absorção os extremos da linha de operação são as composições das correntes de topo (X_0, Y_1) e de fundo (X_N, Y_{N+1}).

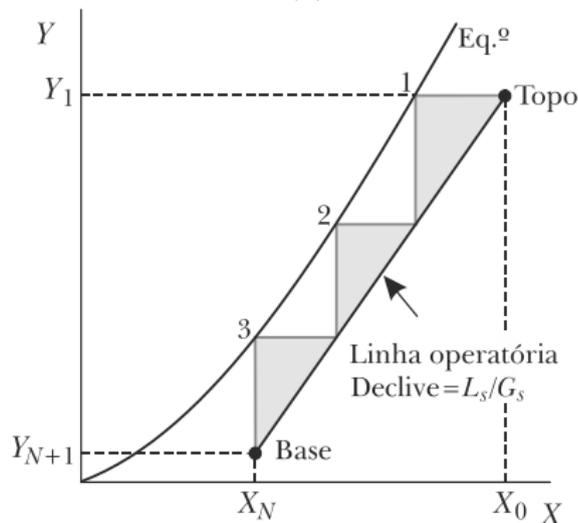
Fonte: Azevedo & Alves (2013).



Absorção & Regeneração



(a) coluna de regeneração



(b) diagrama de McCabe-Thiele

Figura 6: (a) Representação esquemática de uma coluna de regeneração. (b) Construção do diagrama de McCabe-Thiele.

Fonte: Azevedo & Alves (2013).

Método Analítico de Kremser

Equações de Kremser

- O método analítico de Kremser é válido para **soluções diluídas** ($< 1\%$);
- Para soluções diluídas são válidas:
 - L/G constante;
 - Coluna isotérmica e isobárica;
 - Entalpia de absorção desprezível;
 - **Linha de equilíbrio como uma reta:**
 $y = mx + b$, com $m = H_b/p$ e $b = 0$.
- São definidos o **fator de absorção**, $A = L/(mG)$, e o **fator de regeneração**, $S = 1/A = (mG)/L$.

Método Analítico de Kremser

Equações de Kremser

- Quando as linhas de equilíbrio e de operação são **retas paralelas**, ou seja, $L/G = m$:
- **Absorção:**

$$N = \frac{y_{N+1} - y_1}{y_1 - mx_0} \quad (9)$$

- **Regeneração:**

$$N = \frac{x_0 - x_N}{x_N - y_{N+1}/m} \quad (10)$$

pa

Método Analítico de Kremser

Equações de Kremser

- Quando as linhas de equilíbrio e de operação **não** são **retas paralelas**, ou seja, $L/G \neq m$:
- **Absorção:**

$$N = \frac{\ln \left[\left(1 - \frac{mG}{L}\right) \left(\frac{y_{N+1} - y_1^*}{y_1 - y_1^*}\right) + \frac{mG}{L} \right]}{\ln \left(\frac{L}{mG}\right)} \quad (11)$$

- **Regeneração:**

$$N = \frac{\ln \left[\left(1 - \frac{L}{mG}\right) \left(\frac{x_0 - x_N^*}{x_N - x_N^*}\right) + \frac{L}{mG} \right]}{\ln \left(\frac{mG}{L}\right)} \quad (12)$$

Condições Limites de Operação



Condições Limites: Absorção

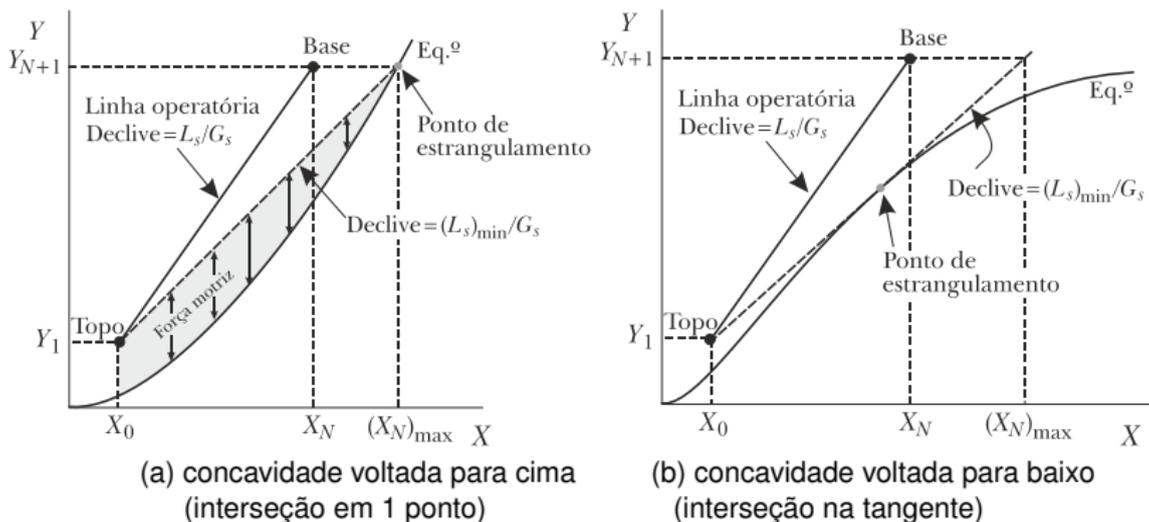


Figura 7: Dois casos (a) e (b) de linhas de operação nas **condições limites** para a **absorção**. Identificação de um **ponto de estrangulamento** entre a linha de operação e a linha de equilíbrio.

Fonte: Azevedo & Alves (2013).

Condições Limites: Regeneração

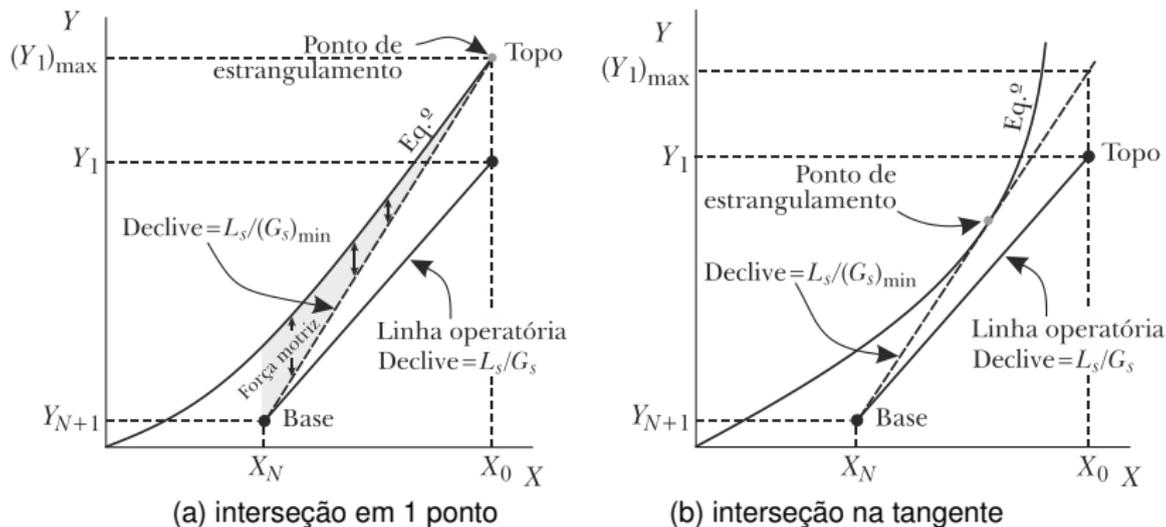


Figura 8: Dois casos (a) e (b) de linhas de operação nas **condições limites** para a **regeneração**. Identificação de um **ponto de estrangulamento** entre a linha de operação e a linha de equilíbrio.

Fonte: Azevedo & Alves (2013).

Condições Limites

Vazão Ótima de Projeto a partir da Condição Limite

- **Absorção** $[(L_S/G_S)_{\min}]$:

$$(L_S)_{\text{op}}/G_S = 1,2 \cdot (L_S)_{\min}/G_S \quad (13)$$

- **Regeneração** $[(L_S/G_S)_{\max}]$:

$$L_S/(G_S)_{\text{op}} = L_S/[1,2 \cdot (G_S)_{\min}] \quad (14)$$



Referências

- AZEVEDO, E. G.; ALVES, A. M. **Absorção e Desabsorção**. In: _____. (Org.). *Engenharia de Processos de Separação*. 2. ed. Lisboa: IST Press, 2013, p. 299-341.
- DUTTA, B. K. **Gas Absorption and Stripping**. In: _____. (Org.). *Principles of Mass Transfer and Separation Process*. New Delhi: Prentice Hall of India, 2007, p. 257-318.
- GEANKOPLIS, C. J. **Absorption in Plate and Packed Towers**. In: _____. (Org.). *Transport Processes and Separation Process Principles (Includes Unit Operations)*. 4. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2003, p. 653-679.



Referências

- HENLEY, E. J.; SEADER, J. D.; ROPER, D. K. **Gas Absorption**. In: _____. (Org.). *Separation Process Principles*. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011, p. 223-279.
- McCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Gas Absorption**. In: _____. (Org.). *Unit Operations of Chemical Engineering*. 7. ed. Boston: McGraw-Hill, 2005, p. 565-615.
- WANKAT, P. C. **Absorption and Stripping**. In: _____. (Org.). *Separation Process Engineering Includes Mass Transfer Analysis*. 3. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2012, p. 453-495.

