



**UNIVERSIDADE FEDERAL
DE LAVRAS**



Departamento de Engenharia (DEG)

Conservação de Massa e Energia



Graduação em Engenharia Química

Prof. Irineu Petri Júnior

2018

Ementa

Conservação de Massa e Energia (CME)

CONTEÚDO PROGRAMÁTICO

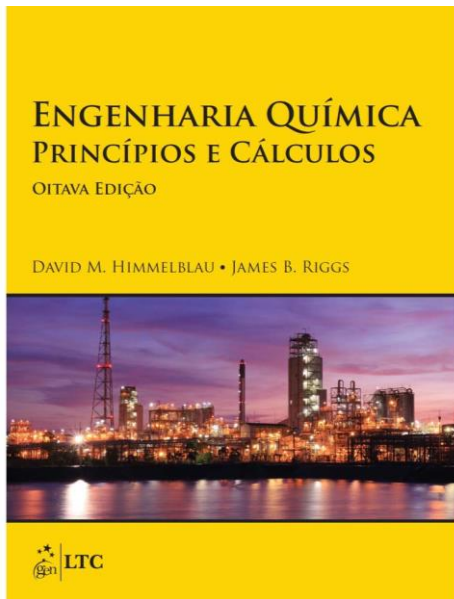
- **1. Conceitos introdutórios**
 - 1.1 Conceitos básicos da Engenharia Química
 - 1.2 Unidades e dimensões
 - 1.3 Mol e massa molar
 - 1.4 Variáveis de processo

- **2. Balanços de massa**
 - 2.1 Balanço de massa sem reação química
 - 2.2 Balanço de massa com reação química

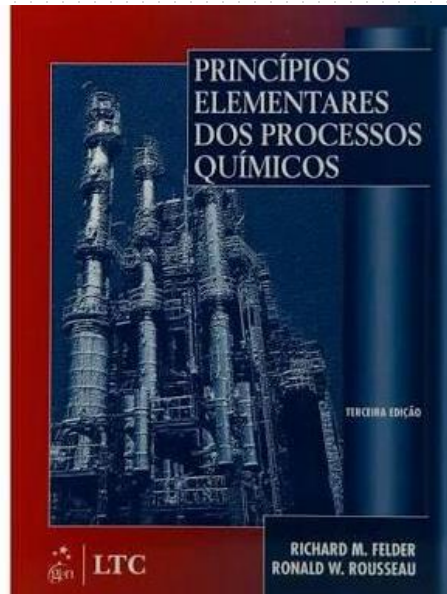
- **3. Balanços de massa para sistemas multiunidades**
 - 3.1 Reciclo, by-pass e purga

- **4. Balanços de energia**
 - 4.1 Balanço de energia sem reação química
 - 4.2 Balanço de energia com reação química
 - 4.2.1 Calor padrão de formação, calor de reação e calor de combustão

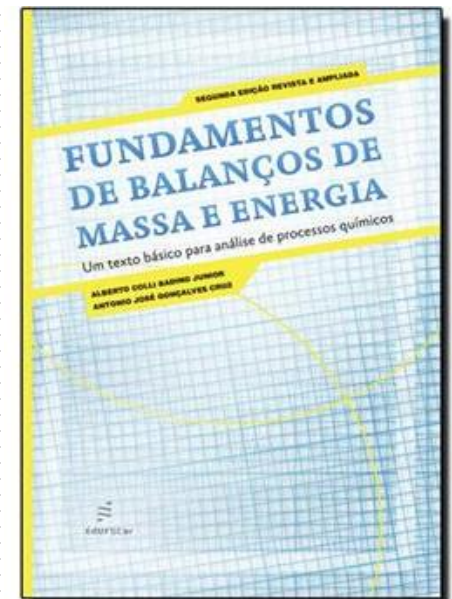
Bibliografia



HIMMELBLAU, D. M.; RIGGS, J. B., **Engenharia química : princípios e cálculos**. Rio de Janeiro, LTC, 2014.



FELDER, R. M.; ROUSSEAU, R. W., **Princípios elementares dos processos químicos**. Rio de Janeiro, LTC, 2005.



BADINO JUNIOR, A. C.; CRUZ, A. J. G. **Fundamentos de balanços de massa e energia: um texto básico para análise de processos químicos**. São Carlos, EdUFSCar, 2013.

Considerações e Regras Gerais

1) As aulas serão:

- Terça-feira às 15h no PV2-110 (15 dias)
- Quinta-feira às 13h no PV2-108 (16 dias)

2) Sistema de Avaliação: três (3) provas (sem consulta) e um (1) provão substitutivo (para aqueles que não atingiram 60% da nota final):

- 1ª avaliação (30%): 02/05/2018 (Capítulo 1)
- 2ª avaliação (30%): 08/06/2018 (Capítulo 2)
- 3ª avaliação (40%): 06/07/2018 (Capítulo 3)
- Provão substitutivo: 13/07/2018 (Capítulo 1, 2 e 3)

3) A média feita entre a nota do aluno e o provão sub. deve ser acima de 60% para que o aluno seja aprovado na disciplina. Independentemente do valor da nota do aluno aprovado, o mesmo ficará com uma nota de 60% no boletim;

4) Qualquer tipo de cola durante a aplicação da prova será penalizado com nota 0 (zero);

5) Todo o material, notas e avisos serão disponibilizados no site www.irineupetri.com;

6) Vista de prova será feita em data/horário definido, não será realizado vista de prova fora disso;

7) Prova de 2ª chamada será agendado pelo professor e contará com uma (1) questão adicional e não haverá a nota de lista de exercícios.

8) Os casos omissos serão resolvidos pelo professor da disciplina e, quando necessário, pelo colegiado do curso de Engenharia Química.

Capítulo 1

1.1 - Introdução

1.2 - Dimensões e Unidades

Dimensões: é uma propriedade que pode ser medida (comprimento [L], tempo [T], massa [M] ou temperatura [θ]) ou calculada pela multiplicação ou divisão de outras dimensões (velocidade [L/T], volume [L³], densidade [M/L³], etc)

Unidades: são valores específicos de dimensões que foram definidas por convenção, costume ou lei, como “g” para massa, “s” para tempo, “cm” para comprimento, etc.

Unidades básicas ou fundamentais

Unidade de dimensões básicas, como “kg” para massa, “cm” para comprimento, “h” para tempo e “°C” para temperatura

Unidades múltiplas

Unidade que são múltiplos ou frações de unidades básicas, como “t” (tonelada) para massa, “ly” (anos-luz) para comprimento e “ms” para temperatura.

Alguns prefixos importantes:

Tera (T) $\rightarrow 10^{12}$

Giga (G) $\rightarrow 10^9$

Mega (M) $\rightarrow 10^6$

kilo (k) $\rightarrow 10^3$

centi (c) $\rightarrow 10^{-2}$

mili (m) $\rightarrow 10^{-3}$

micro (μ) $\rightarrow 10^{-6}$

nano (n) $\rightarrow 10^{-9}$

pico (p) $\rightarrow 10^{-12}$

Unidades derivadas

As unidades derivadas são obtidas pela multiplicação/divisão de unidades básicas ou múltiplas, por exemplo, m/s, cm² e ft³; ou definidas como unidades compostas, como Newton (1N = 1 kg.m/s²) e Pascal (1 Pa = 1 N/m²)

As unidades podem ser tratadas como variáveis algébricas quando as quantidades são somadas, subtraídas, multiplicadas ou divididas. Os valores numéricos de duas quantidades podem ser somadas ou subtraídas apenas se tiverem as mesmas unidades.

Ex.:

$$3 \text{ cm} - 1 \text{ cm} =$$

$$7 \frac{\text{km}}{\text{h}} * 4 \text{ h} =$$

$$3 \text{ cm} - 1 \text{ mm} =$$

$$6 \text{ cm} * 5 \frac{\text{cm}}{\text{s}} =$$

$$3 \text{ cm} - 1 \text{ s} =$$

$$3 \text{ N} * 4 \text{ m} =$$

$$5 \frac{\text{kg}}{\text{s}} / 0,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} =$$

$$5 \text{ km} / 2 \text{ h} =$$

$$3 \text{ m} * 4 \text{ m} =$$

Consistência dimensional

As equações devem ter uma homogeneidade em cada termo que é somado ou subtraído. Caso contrário a operação não pode ser feita, tornando-a inconsistente.

Ex.:

$$\left(P + \frac{a}{V^2} \right) (V - b) = RT \quad \text{Modelo de Van der Waals}$$

$$k = A_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT} \right) \quad \text{Equação de Arrhenius}$$

$$\frac{dP}{dz} = -\frac{G}{\rho g_c D_p} \left(\frac{1-\phi}{\phi^3} \right) \left[\frac{150(1-\phi)\mu}{D_p} + 1,75G \right] \quad \text{Equação de Ergun}$$

Sistemas de Unidades

Os sistemas de unidades mais usuais são:

- SI (sistema internacional)
- CGS (cm-g-s)
- SAE (Sistema Americano de Engenharia)

| Sistema | SI | | CGS | | SAE | |
|--|------------|---------|-----------------------------|----------------------|-----------------------|---------|
| | unidade | símbolo | unidade | símbolo | unidade | símbolo |
| Comprimento (L) | metro | M | centímetro | cm | pé | ft |
| Massa (M) | quilograma | kg | grama | g | libra-massa | lbm |
| Tempo (T) | segundo | S | segundo | s | segundo | s |
| Temperatura (θ) | Kelvin | K | Celsius | °C | Rankine ou Fahrenheit | R ou °F |
| Força (F) | Newton | N | dina (g.cm/s ²) | dina | libra-força | lbf |
| Pressão (P) | Pascal | Pa | dina/cm ² | dina/cm ² | lbf/in ² | psi |
| Energia (E) | Joule | J | erg (dina.cm) | | British Thermal Unit | BTU |

Há também um conjunto formado fora dos sistemas tradicionais de grande importância na indústria de processos químicos:

- Força: kgf
- Pressão: atm, bar, kgf/cm², mmHg, mca
- Energia: cal
- Potência: cv e hp

Conversão de Unidades

A equivalência entre duas expressões da mesma quantidade pode ser definida em termos de uma razão, que são conhecidas como fatores de conversão:

$$\frac{1 \text{ cm}}{10 \text{ mm}} \text{ ou } \frac{10 \text{ mm}}{1 \text{ cm}}$$

Para converter uma quantidade expressa em termos de uma unidade ou seu equivalente em termos de outra unidade, multiplique a quantidade dada pelo fator de conversão (unidade nova/ unidade velha)

Ex.:

$$36 \text{ mg} \rightarrow \text{g}$$

$$1 \text{ cm} \rightarrow \text{mm}$$

$$1 \text{ mm}^2 \rightarrow \text{cm}^2$$

$$1 \text{ cm/s}^2 \rightarrow \text{km/ano}^2$$

$$23 \text{ lbm.ft/min}^2 \rightarrow \text{kg/cm.s}^2$$

$$1 \text{ hp} + 300 \text{ W} =$$

Dica: Utilizar a tabela de conversão de unidades fornecida no site www.irineupetri.com

Exemplo 1

1.3 - Mol e massa molar

Peso molecular: é a soma dos pesos atômicos dos átomos que constituem uma molécula do composto.

Ex.:

$$\text{O (oxigênio)} = 16 \text{ g/gmol}$$

$$\text{O}_2 = 32 \text{ g/mol}$$

Outros tipos de peso molecular: kmol, lbmol, tonmol, etc.

Ex.: CO (monóxido de carbono) = $12+16 = 28 \text{ g/gmol}$

ou seja,

1 mol de CO tem 28g

1 lbmol de CO tem 28 lb

1 tonmol de CO tem 28 ton

O número de mols de um determinado composto é calculado através da razão entre a massa do composto (m) e sua massa molecular (MM).

Ex.: $m_{\text{H}_2\text{O}} = 36 \text{ g}$

$$\dot{m}_{\text{CO}} = 127 \text{ g/h}$$


$$n = \frac{m}{MM}$$

Dica do tio Irineu: “*ENGENHEIRO QUÍMICO usa balanço molar somente quando há reação química”*

1.4 – Variáveis de processo

Massa específica e densidade: o quociente entre a massa e o volume de uma substância é conhecido como massa específica (ρ). Já a densidade (d) é definida como a relação entre massas específicas de duas substâncias, sendo uma delas tomada como padrão (a água a 4°C é geralmente utilizada como referência), sendo assim uma grandeza adimensional.


$$\rho = \frac{m}{V} \left[\frac{kg}{m^3} \text{ ou } \frac{lbm}{ft^3} \right]$$
$$d = \frac{\rho}{\rho_{H_2O, 4^\circ C}} \quad [-]$$


0,9999720 g / cm³


Densidades de aplicação industrial

Graus Baumé (°Be): Uma escala para densidade de soluções aquosas à uma temperatura de 60°F (15,6°C), muito usada por indústrias de vinhos, cervejas, ácidos, etc.

$$^\circ Be = 145 - \frac{145}{d_{60^\circ F}}$$


Para líquidos mais densos
que H₂O

$$^\circ Be = 140 - \frac{130}{d_{60^\circ F}}$$


Para líquidos menos densos
que H₂O

Grau API (°API): O Grau API (em inglês, API Gravity) é uma escala arbitrária que mede a densidade dos líquidos derivados do petróleo. Quanto mais densidade o óleo tiver, menor será seu grau API.

$$^{\circ} API = \frac{141,5}{d_{60^{\circ}F}} - 131,5$$

Petróleos com grau API maior que 30 são considerados leves; entre 22 e 30 graus API, são médios; abaixo de 22 graus API, são pesados; com grau API igual ou inferior a 10, são petróleos extrapesados. Quanto maior o grau API, maior o valor do petróleo no mercado.

Graus Gay-Lussac (°GL): medida de “densidade” de soluções alcoólicas. É a quantidade em mililitros de álcool absoluto contida em 100 mililitros de mistura hidro-alcoólica.

$$^{\circ} GL = \frac{V_{\text{etanol}}}{V_{\text{solução}}} * 100\%$$

No Brasil é utilizado o °INPM (Instituto de Pesos e Medidas), que é a quantidade em gramas de álcool absoluto contida em 100 gramas de mistura hidro-alcoólica.

$$^{\circ} INPM = \frac{m_{\text{etanol}}}{m_{\text{solução}}} * 100\%$$

Grau Brix (°Bx): A escala Brix é utilizada na indústria de alimentos para medir a quantidade aproximada de açúcares em sucos de fruta, vinhos e na indústria de açúcar, bem como outras soluções. Um grau Brix (1°Bx) é igual a 1g de açúcar por 100 g de solução, ou 1% de açúcar.

Volume específico (\hat{V}): O volume específico é o inverso da massa específica, muito utilizado em tabelas termodinâmicas para gases e líquidos.

$$\hat{V} = \frac{1}{\rho} \left[\frac{m^3}{kg} \text{ ou } \frac{ft^3}{lbm} \right]$$

Frações molares e mássicas

As correntes de processo ocasionalmente contêm apenas uma substância, porém o mais comum é que consistam em misturas de líquidos ou gases, ou em soluções de um ou mais componentes em um solvente líquido. Por isso, as frações mássicas e molares são utilizadas para determinar a fração de um componente na mistura.

Fração mássica: $x_A = \frac{m_A}{m_T} \text{ ou } \left[\frac{kg A}{kg total} \right]$

$$m_T = m_A + m_B + m_C + \dots$$

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1$$

Fração molar: $y_A = \frac{n_A}{n_T} \text{ ou } \left[\frac{kmol A}{kmol total} \right]$

$$n_T = n_A + n_B + n_C + \dots$$

$$\sum_{i=1}^n y_i = 1$$

Fração volumétrica:

$$w_A = \frac{V_A}{V_T} \text{ ou } \left[\frac{\text{m}^3 A}{\text{m}^3 \text{ total}} \right]$$
$$\sum_{i=1}^n w_i = 1$$
$$V_T = V_A + V_B + V_C + \dots$$

Para gases ideais: $y_i = w_i$

Ex.: $y_{O_2} = 21\%$ em mol ou volume

Massa molecular média (\overline{MM}):

$$\overline{MM} = \sum_{i=1}^n (y_i * MM_i)$$

Massa específica média ($\bar{\rho}$):

$$\bar{\rho} = \sum_{i=1}^n (x_i * \rho_i)$$

Ex.: Qual a massa molecular e específica média do ar?

(Dados do Perry's Handbook of Chemical Engineering)

Concentrações

A concentração mássica de um componente em uma mistura ou em uma solução é a massa deste componente por unidade de volume da mistura (g/cm³, lbm/ft³, kg/m³, etc)

$$C_A = \frac{m_A}{V_{sol}}$$

A concentração molar de um componente é o número de mols por unidade de volume da mistura. A molaridade de uma solução é o valor da concentração molar do soluto expressa em moles de solutos por litros de solução (kmol/m³, lbmol/ft³, etc).

$$M_A = \frac{n_A}{V_{sol}}$$

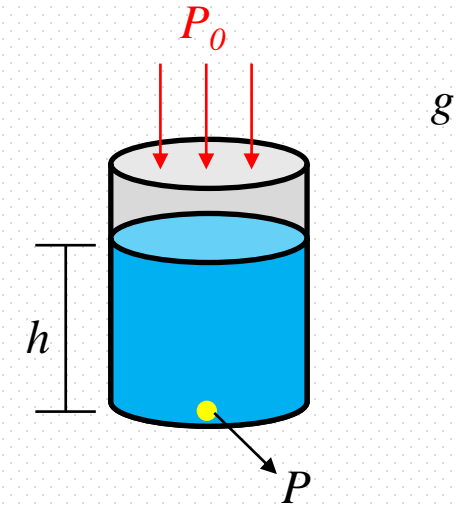
Vazões e Fluxos

Pressão e carga hidrostática

Suponhamos que uma coluna vertical contém líquido até uma altura “h” e apresenta uma seção transversal uniforme de área A. O líquido tem uma massa específica ρ e acima desta coluna é aplicada uma pressão P_0 . Desta forma a pressão do fluido P na base da coluna – chamada pressão hidrostática do fluido – é, por definição, a soma da pressão P_0 e a carga hidrostática do fluido:

$$P = P_0 + \rho gh$$

Se P_0 for a pressão atmosférica, a pressão P é chamada de pressão manométrica.



Pressão relativa e absoluta

A pressão manométrica é uma pressão relativa à pressão atmosférica, isso quer dizer que se a pressão manométrica for igual a zero a pressão do sistema é a própria pressão atmosférica. Caso essa pressão fosse negativa estaríamos em um sistema no vácuo. Caso contrário, se a pressão fosse positiva estaríamos em um sistema pressurizado. A relação entre a pressão relativa e a pressão absoluta é dada por:

$$P_{abs} = P_{rel} + P_{atm}$$

Equipamentos para medição de Pressão

Exemplo 2

Lista de Exercícios I

www.irineupetri.com