

# INTRODUÇÃO AOS PROCESSOS QUÍMICOS

## 1. Os Processos Químicos

Um processo químico é qualquer operação ou conjunto de operações coordenadas que causam uma transformação física ou química em um material ou misturas de materiais. O objetivo dos processos químicos é a obtenção de produtos desejados a partir de matérias primas selecionadas ou disponíveis. Os processos químicos são, do ponto de vista de produção industrial, desenvolvidos dentro da chamada indústria química que se divide em diversas ramificações.

A abrangência da definição de “processo químico” é tão grande que engloba setores específicos de grande magnitude como os metalúrgicos, nucleares e farmacêuticos, ao lado de outros como os processos petroquímicos, plásticos, cerâmicos, de síntese de produtos inorgânicos, orgânicos, ou bioquímicos, etc. Shreve e Brink Jr em seu livro “Indústrias de Processos Químicos” classifica trinta e oito tipos de processamentos químicos industriais de relevância. São eles:

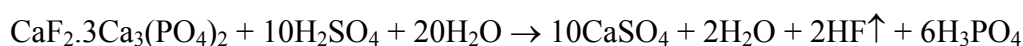
- Tratamento de água e proteção do meio ambiente
- Energia, combustíveis, condicionamento de ar e refrigeração
- Produtos carboquímicos
- Gases combustíveis
- Gases industriais
- Carvão industrial
- Indústrias de cimento
- Indústrias de vidro
- Cloreto de sódio e outros compostos de sódio
- Indústria do cloro e dos álcalis: barrilha, soda cáustica e cloro
- Indústrias eletroquímicas
- Indústrias eletrotérmicas
- Indústrias de fósforo
- Indústrias de potássio
- Indústrias do nitrogênio
- Enxofre e ácido sulfúrico
- Ácido clorídrico e diversos compostos inorgânicos
- Indústrias nucleares
- Explosivos, agentes químicos tóxicos e propelentes
- Indústrias de produtos fotográficos
- Indústrias de tintas e correlatos
- Indústrias de alimentos e co-produtos
- Indústrias agroquímicas
- Perfumes, aromatizantes e aditivos alimentares
- Óleos, gorduras e ceras
- Sabões e detergentes
- Indústrias do açúcar e do amido
- Indústrias de fermentação
- Derivados químicos da madeira
- Indústrias de polpa de papel
- Indústrias de fibras e películas sintéticas
- Indústrias da borracha
- Indústrias de plásticos
- Refinação do petróleo
- Indústria petroquímica
- Intermediários, corantes e suas aplicações
- Indústria farmacêutica

Nos processos químicos ocorrem transformações químicas ou físicas da matéria. Embora a maioria englobe conversões químicas (ou bioquímicas), em alguns processos ocorrem apenas transformações físicas da matéria. A destilação do petróleo para obtenção de algumas frações, a obtenção do açúcar da cana e a extração de óleos vegetais, são exemplos típicos de processos químicos onde não ocorrem conversões químicas essenciais. Além disso, mesmo naqueles processos onde a conversão química é a operação principal, uma série de operações físicas preliminares é necessária para a preparação da matéria prima e seu transporte até o equipamento de reação (reator) bem como para o tratamento, purificação e transporte do efluente do reator para a obtenção do produto (um ou mais) final.

Várias são as operações físicas de interesse da indústria química. As principais são (ver Perry e Chilton):

- Transporte e armazenamento de fluidos (bombeamento, compressores, sopradores, tubulações, válvulas, tanques)
- Manipulação de sólidos a granel e embalados (esteiras, transporte pneumático e fluidizado, armazenamento)
- Cominuição e aglomeração (britagem, moagem, agregação, granulação)
- Produção e transporte de calor (combustíveis, fornos, combustão, geração e transmissão de energia)
- Equipamentos de transferência de calor (evaporadores, trocadores de calor)
- Condicionamento de ar e refrigeração
- Destilação
- Absorção de gases
- Extração em fase líquida
- Adsorção e troca iônica
- Diversos processos de separação (lixiviação, cristalização, sublimação, difusão,...)
- Sistemas líquido-gás (equipamentos de contato e separação)(contato gás-líquido, dispersão e separação de fases)
- Sistemas líquido-sólido (equipamentos de contato e separação)(filtros, centrífugas, misturadores, agitadores)
- Sistemas gás-sólido (equipamentos de contato e separação)(secadores, leitos fluidizados, separadores)
- Sistemas líquido-líquido e sólido-sólido (equipamentos de contato e separação (misturadores, peneiração, flotação, separação eletrostática).

Como exemplo, suponhamos a obtenção de ácido fosfórico a partir de minério fosfático usando o processo chamado de via úmida. Através dele, o concentrado fosfático (fluorapatita) reage com ácido sulfúrico concentrado, dentro da seguinte estequiometria:



É claro que para a reação acontecer, as matérias primas precisam ser trabalhadas para entrarem no reator dentro das características técnicas especificadas (definidas a partir das pesquisas). Assim o concentrado fosfático, que além da fluorapatita (portadora de fósforo) contém outros minerais que atuam como impurezas. Este concentrado deverá ter o teor adequado de  $\text{P}_2\text{O}_5$  (operação de concentração por flotação) e ter a granulometria conveniente (operações de moagem e classificação) já que isto influenciará decisivamente a cinética da reação. Já o ácido deve estar na concentração desejada (operações de concentração ou diluição em  $\text{H}_2\text{O}$ ) e eventualmente na

temperatura definida (operação de troca térmica). As duas matérias primas principais necessitarão ser transportadas até o reator na dosagem certa, definida pela estequiometria e pela cinética: o mineral por ser sólido poderá ser transportado através de correias e elevadores de caneca até o alimentador, enquanto o ácido sulfúrico deve continuamente ser alimentado ao reator através de bombas especiais, dentro de uma faixa de vazões controladas. Decorrida a reação teremos o ácido, o sulfato de cálcio e outras substâncias. É necessário, portanto, separar-se o produto ( $H_3PO_4$ ) dessas demais substâncias. O processo convencional prevê a filtração a vácuo. A torta do filtro é formada pela fase sólida da mistura, enquanto o filtrado se constitui em um  $H_3PO_4$  diluído. Como não se pretende vender nem transportar água, dentro de certos limites, o ácido diluído deverá ainda ser concentrado (através de evaporação) antes da comercialização. Novamente entre a saída do reator e o destino do produto e do rejeito, ocorrem as necessárias operações de transporte.

Em linguagem de engenharia química, todo este texto descritivo é substituído por um desenho esquemático chamado de **fluxograma** (*flow chart*). Utilizando-se blocos, outros símbolos que representem unidades de processo (reatores, destiladores, evaporadores, etc...) e linhas que indicam os caminhos de fluxo das matérias primas e dos produtos, descreve-se o processo de forma simples e objetiva, através de uma coordenação seqüencial que integra as unidades de conversão química (reatores) às demais unidades de operações físicas (chamadas classicamente de operações unitárias). O material que entra em uma dada unidade de processo é chamado de alimentação (“input” ou “feed”) e o que a deixa é chamado de produto (“output” ou “product”). O diagrama de blocos é, na verdade, o fluxograma mais simples, que indica as principais unidades de processo e traz informações sobre as variáveis de processo principais. Um fluxograma mais elaborado traz mais detalhes como o dimensionamento dos equipamentos, as malhas de controle automático, os materiais de construção e outras informações importantes.

Como exemplo de fluxogramas, observe a figura que segue. Um diagrama de blocos indica de modo bem simples o processo de obtenção de ácido fosfórico descrito anteriormente.

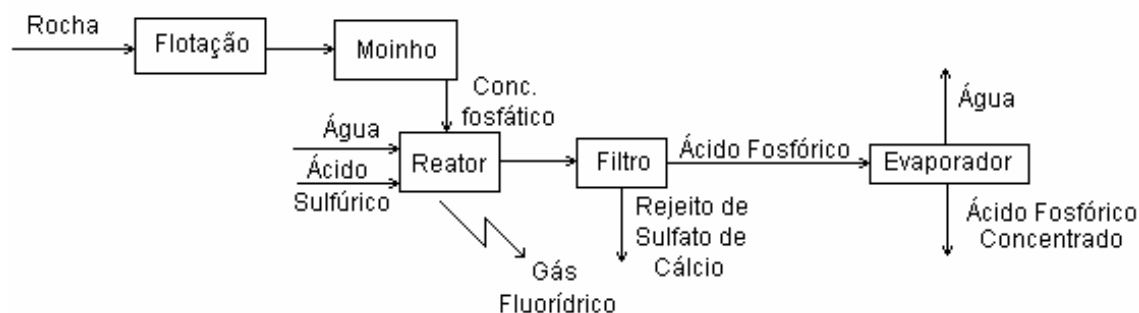


Diagrama de blocos do processo de fabricação de ácido fosfórico via úmida.

## Exercícios

1. No Brasil principal fonte de obtenção de álcool é a partir da cana-de-açúcar, através de um processo bioquímico que envolve a fermentação anaeróbia do caldo de cana por microorganismos. Partindo da cana, quando esta entra na usina, imaginem quais deveriam ser os processos unitários necessários até a produção de álcool. Descreva o processo através de um diagrama de blocos simplificado.
2. Procure nas enciclopédias de tecnologia química, o processo de fabricação de poliéster. Copie o fluxograma procurando identificar as diferentes operações envolvidas.

## 2. A análise dos Processos Químicos

Dada uma unidade de processo ou um processo como um todo o problema básico é calcular as quantidades e propriedades dos produtos a partir das quantidades e propriedades das matérias primas ou vice-versa. Este curso objetiva a apresentação de uma abordagem sistemática para a resolução de problemas deste tipo. A partir das variáveis em jogo, chamadas de variáveis de processo, cujas principais serão apresentada e discutidas aqui, estabeleceremos as equações que as relacionam, a partir dos princípios universais da conservação da massa e energia e informações termodinâmicas. A partir daí resolveremos problemas típicos do dia-a-dia do engenheiro químico. Para tanto é fundamental iniciar-se revendo a forma de expressar as quantidades, através do estudo das dimensões e unidades.

## 3. Unidades e Dimensões

Uma medida tem um valor (número) e uma unidade: 2 ft; 1m; 1/3 seg; 4 km, 6 tomates. Uma dimensão é uma propriedade que pode ser medida, como: comprimento; tempo; massa; temperatura ou calculada, pela multiplicação ou divisão de outras dimensões: velocidade (comprimento/tempo) volume (comprimento x comprimento x comprimento).

### 3.1. Conversão de unidades

Para converter uma quantidade expressa em termos de uma unidade para seu equivalente em termos de outra, multiplica-se a dada quantidade pelo fator de conversão (nova unidade/velha unidade). Por exemplo: para converter 36 *in* no seu equivalente em *ft*, escreveremos:

$$36in \times \frac{1ft}{12in} = 3ft$$

Note como as velhas unidades se cancelam, permanecendo a unidade desejada. Para evitarem-se erros, convém escrever todas as unidades e verificar se as velhas se cancelam. Observe:

$$36in \times \frac{12in}{1ft} = 432 \frac{in^2}{ft}$$

Errado, já que não era isso que nós gostaríamos de calcular. Para unidades compostas, o procedimento é o mesmo. Exemplo: Converter a aceleração 1  $in/s^2$  em milhas/ano<sup>2</sup>

Dados: 1h = 3600s, 1 dia = 24 h, 1 ano = 365 dias

1ft = 12 in, 1 milha = 5280 ft, então

$$\frac{1in}{s^2} \left( \frac{3600s}{1h} \right)^2 \left( \frac{24h}{1dia} \right)^2 \left( \frac{365dias}{1ano} \right)^2 \left( \frac{1milha}{5280ft} \right) \left( \frac{1ft}{12in} \right) = 1,57 \times 10^{10} \text{ milhas / ano}^2$$

### 3.2. Sistemas de Unidades

Um sistema de unidades se compõe de:

**a) Unidades Básicas:** que são as unidades para as dimensões básicas; a saber: Massa, comprimento, tempo, temperatura, corrente elétrica e intensidade luminosa. Exemplos: segundo, ampere, grama.

**b) Unidades Múltiplas:** múltiplos ou frações das unidades básicas. Por

Ex: para a unidade básica segundo, temos como unidades múltiplas: h, min, milissegundos.

**c) Unidades Derivadas**

- c.1) obtidas pela multiplicação ou divisão das unidades básicas ou múltiplos, chamadas de compostas. Ex: cm.cm; ft/min; kg.m/s<sup>2</sup>;
- c.2) como equivalentes a unidades compostas como o erg = 1g cm<sup>2</sup>/s<sup>2</sup> ou 1 lbf = 32,174 lbf.ft/s<sup>2</sup>.

O sistema de unidades oficial atualmente é o Sistema Internacional (SI) e o Sistema Inglês. Entretanto existem outros ainda em uso. São os sistemas CGS (centímetro, grama e segundo) o MKS (metro, quilograma-força e segundo).

### 3.3 Homogeneidade dimensional e quantidades adimensionais

Toda equação válida deve ser dimensionalmente homogênea, isto é: todos os termos de ambos os lados da equação precisam ter as mesmas unidades. Considerando a equação:

$$V(\text{ft/s}) = V_0 (\text{ft/s}) + g (\text{ft/s}^2) t(\text{s})$$

Observe que todos os termos sendo somados possuem a mesma unidade ft/s.

### 3.4 Cálculos aritméticos: notação científica, algarismos significativos e precisão

Uma maneira conveniente de representarem-se números é através da notação científica, na qual um número é expresso como um produto de outro número (usualmente entre 0,1 e 10) e a potência de 10.

Exemplos:  $123.000.000 = 1,23 \times 10^8$   
 $0,000028 = 2,8 \times 10^{-5}$

Os algarismos significativos de um número são os dígitos a partir do primeiro dígito não zero da esquerda até o último dígito (zero ou não zero) da direita se há um ponto decimal, ou o último dígito não zero se não há ponto decimal.

Exemplos:

2300 ou $2,3 \times 10^3$	- 2 alg. sign. (não tem ponto decimal)
2300,0 ou $2,3000 \times 10^3$	- 5 alg. sign. (tem ponto decimal)
23040 ou $2,304 \times 10^4$	- 4 alg. sign. (não tem ponto decimal)
0,035 ou $3,5 \times 10^{-2}$	- 2 alg. sign. (tem ponto decimal)
0,03500 ou $3,500 \times 10^{-2}$	- 4 alg. sign. (tem ponto decimal)

Observe que o número de algarismos significativos é facilmente mostrado na notação científica. O número de algarismos significativos de uma medida fornece uma indicação da precisão com que a quantidade é conhecida. \*Um valor é mais preciso quanto maior seu número de algarismos significativos. Nas operações matemáticas, uma regra prática é a que segue:

"Quando 2 ou mais quantidades são combinadas por multiplicação ou divisão, o número de algarismos significativos do resultado deve ser igual ao do menor número de algarismos significativos dentre as quantidades envolvidas

Exemplos:

$$(3,57) \times (4,286) = 15,30102 = 15,3$$

(3)      (4)                      (7)      (3)

$$(5,2 \times 10^{-4})(0,1635 \times 10^7)/(2,67) = 318,426966 = 3,2 \times 10^2 = 320$$

(2)                      (4)      (3)                      (9)

Para a adição ou subtração temos: "Quando 2 ou mais números são adicionados ou subtraídos, a posição do último algarismo significativo de cada número deve ser comparada. Dessas posições, aquela mais à esquerda é a posição do último algarismo significativo permissível na soma.

#### 4. Variáveis de Processo

Para se projetar, supervisionar ou modificar um processo, precisa-se conhecer as quantidades, composições e condições dos materiais que entram e saem da unidade, bem como saber medi-las. Neste capítulo serão apresentadas definições, técnicas de medidas e métodos para cálculo dessas variáveis.

##### 4.1. Massa, Volume e Densidade

- A densidade ( $\rho$ ) de uma substância é a massa por unidade de volume da substância (kg/m<sup>3</sup>, g/cm<sup>3</sup>, lbm/ft<sup>3</sup>, etc...)
- O volume específico ( $v$ ) é o volume por unidade de massa (m<sup>3</sup>/kg, ft<sup>3</sup>/lbm), e, portanto, o inverso da densidade.

A densidade de sólidos e líquidos puros são relativamente independentes da temperatura e da pressão e podem ser encontradas em referências padrões (Perry e Chilton, 3-6 a 3-44). A densidade de uma substância pode ser usada como um fator de conversão para relacionar massa e volume.

Exemplos: A densidade ( $\rho$ ) do tetracloreto de carbono é 1,595 g/cm<sup>3</sup>. A massa de 20,0 cm<sup>3</sup> de CCl<sub>4</sub> é, portanto,

$$m = 20 \text{ cm}^3 \left( \frac{1,595 \text{ g}}{\text{cm}^3} \right) = 31,9 \text{ g}$$

e o volume de 6,20 lb de CCl<sub>4</sub> é

$$6,20 \text{ lbm} \left( \frac{454 \text{ g}}{\text{lbm}} \right) \left( \frac{1 \text{ cm}^3}{1,595 \text{ g}} \right) = 1765 \text{ cm}^3$$

A densidade específica ou relativa ("specific gravity" - SG) de uma substância é a relação entre a densidade dessa substância e a de uma substância de referência, em condições especificadas.

$$SG = \frac{\rho}{\rho_{ref}}$$

A referência mais comumente usada para sólidos e líquidos é a água a 4,0°C, onde  $\rho_{ref} (\text{H}_2\text{O}, 4^\circ\text{C}) = 1,000\text{g/cm}^3 = 1000 \text{ kg/m}^3 = 62,43 \text{ lbm/ft}^3$

A notação  $SG = 0,6$  a  $20^\circ/4^\circ$  significa que a  $SG$  de uma substância a  $20^\circ\text{C}$  com referência à água a  $4^\circ\text{C}$  é 0,6. Existem outras unidades particularmente usadas na indústria de petróleo, como:

Bé (Baumé)  
API (A.P.I.)  
Tw (Twaddell)

Suas definições e fatores de conversão são dados no Perry, p.1-28

Exercício resolvido.

Calcule a densidade do Hg em  $\text{lbm/ft}^3$  a partir dos dados tabelados de densidade específica ( $SG$ ), e calcule o volume em  $\text{ft}^3$  ocupados por 200Kg de Hg.

Segundo o Perry e Chilton – pg. 3-17

$SG(\text{Hg})_{20^\circ\text{C}} = 13,456$ ,  $\rho(\text{Hg}) = 13,456 \times 62,43 \text{ lbm/ft}^3 = 845,64 \text{ lbm/ft}^3$

$$V = 200\text{kg} \left( \frac{1\text{lbm}}{0,453\text{kg}} \right) \left( \frac{1\text{ft}^3}{845,7\text{lbm}} \right) = 0,521\text{ft}_3$$

## 4.2 Vazão

Processos contínuos envolvem o movimento de materiais de um ponto a outro entre as unidades de processo. A vazão pode ser expressa em termos mássicos, representada normalmente por  $\dot{m}$  dada em massa/tempo ou volumétrica, expressa em termos de volume/tempo.

## 4.3 Composição química (mol e massa molecular)

Um grama-mol ou simplesmente mol de uma espécie química é a quantidade dessa espécie cuja massa em gramas seja numericamente igual à sua massa molecular. Outros tipos de mol podem ser usados conforme a conveniência e são similarmente definidos.

Exemplo:

Monóxido de carbono (CO) tem massa molecular igual a 28.

1 mol CO contém 28 g

1 kmol CO contém 28 kg

1 lb-mol CO contém 28 lbm

1 ton-mol CO contém 28 ton

## 4.4 Fração mássica e fração molar.

São pouco freqüentes as correntes de processo que contêm apenas uma substância. É mais comum serem constituídas de misturas de líquidos ou gases, ou soluções de um ou mais solutos em um solvente líquido. Os seguintes termos são usados para definir a composição de uma mistura de substâncias incluindo a espécie A:

**Fração mássica ( $x_A$ ):**

$$x_A = \frac{\text{massa}_A}{\text{massa}_{\text{total}}} \left( \frac{\text{kg}_A}{\text{kg}_{\text{total}}}, \frac{\text{g}_A}{\text{g}_{\text{total}}}, \frac{\text{lb}_A}{\text{lb}_{\text{total}}}, \frac{\text{ton}_A}{\text{ton}_{\text{total}}} \right)$$

**Fração molar ( $y_A$ ):**

$$x_A = \frac{\text{mol}_A}{\text{mol}_{\text{total}}} \left( \frac{\text{kmol}_A}{\text{kmol}_{\text{total}}}, \frac{\text{gmol}_A}{\text{gmol}_{\text{total}}}, \frac{\text{lbmol}_A}{\text{lbmol}_{\text{total}}}, \frac{\text{tonmol}_A}{\text{tonmol}_{\text{total}}} \right)$$

*Multiplicando-se por 100, tem-se a fração em termos de porcentagem.*

Exercício exemplo:

Tem-se uma solução 15% A em massa e 20% B em mols. Calcule:

a) a massa de A em 200 kg de solução.

$$x_A = 0,15 \quad \rightarrow \quad 200\text{kg} \left( \frac{0,15\text{kg}_A}{\text{kg}} \right) = 30\text{kg}_A$$

b) a vazão mássica de A na corrente que está fluindo à vazão de 50 lbm/h.

$$\frac{50\text{lbm}}{\text{h}} \left( \frac{0,15\text{lbm}_A}{\text{lbm}} \right) = \frac{7,5\text{lbm}_A}{\text{h}}$$

c) a vazão molar de B numa corrente de 1000 mols solução/min.

$$\frac{1000\text{mol}}{\text{min}} \left( \frac{0,20\text{mol}_B}{\text{mol}} \right) = \frac{200\text{mol}_B}{\text{min}}$$

d) a vazão total de solução que corresponde à vazão molar de 25 kmol de B/s.

$$\frac{25\text{kmol}_B}{\text{s}} \left( \frac{1\text{kmol}}{0,2\text{kmol}_B} \right) = \frac{125\text{kmol}_{\text{solução}}}{\text{s}}$$

e) a massa da solução que contém 300 lbm de A.

$$300\text{lb}_A \left( \frac{1\text{lb}}{0,15\text{lb}_A} \right) = 2000\text{lb}_{\text{solução}}$$

Observações:

- 1) Note que as frações mássicas e molares independem da unidade;
- 2) Um conjunto de frações mássicas pode ser convertido num conjunto de frações molares.



#### 4.5 Massa molecular média.

A massa molecular média ( $M_{\text{média}}$ ) de uma mistura (g/gmol, kg/kmol, lbm/lbmol, etc....) é a razão da massa de uma amostra da mistura ( $m_t$ ) pelo número de mols de todas as espécies da amostra.

Se  $y_i$  é a fração molar do componente  $i$  da amostra e  $M_i$  é a massa molecular desse componente, sendo

$$M_{\text{média}} = \frac{m_t}{n_t} = \frac{m_1 + m_2 + m_3 + \dots}{n_t} = \frac{m_1}{n_t} + \frac{m_2}{n_t} + \frac{m_3}{n_t} + \dots$$

onde  $y_1 = \frac{n_1}{n_t}$  e  $n_1 = \frac{m_1}{M_1} \rightarrow y_1 M_1 = \frac{m_1}{n_t}$ ,

que substituída na equação acima, resulta em

$$M_{\text{média}} = y_1 M_1 + y_2 M_2 + y_3 M_3 + \dots = \sum_i y_i M_i \quad (\text{todos os componentes})$$

Conclusão: A massa molecular média de uma mistura é a média ponderada das massas moleculares existentes.

da mesma forma  $\frac{1}{M_{\text{média}}} = \frac{n_t}{m_t} = \frac{n_1 + n_2 + n_3 + \dots}{m_t} = \frac{n_1}{m_t} + \frac{n_2}{m_t} + \frac{n_3}{m_t} + \dots$

onde...  $x_1 = \frac{m_1}{m_t}$  e  $m_t = \frac{m_1}{x_1} \rightarrow \frac{n_1 x_1}{m_1} = \frac{x_1}{m_1 / n_1} = \frac{x_1}{M_1}$

que substituída na equação acima resulta em

$$\frac{1}{M_{\text{média}}} = \frac{x_1}{M_1} + \frac{x_2}{M_2} + \frac{x_3}{M_3} + \dots$$

Exercício:

Calcule a massa molecular média do ar.

a) a partir das composições molares aproximadas: 79%  $N_2$  e 21%  $O_2$

b) a partir das composições mássicas aproximadas: 76,7%  $N_2$  e 23,3%  $O_2$

Solução:

a)  $M(\text{ar}) = y(N_2)M(N_2) + y(O_2)M(O_2)$

$$M(\text{ar}) = 0,21 \times 32 + 0,79 \times 28 = 28,84 \text{g/mol}$$

b)  $\frac{1}{M_{\text{média}}} = \frac{0,767}{28} + \frac{0,233}{32} = 0,035 \text{ mol (ar) / g (ar)} = 28,84 \text{ g (ar) / mol (ar)}$

#### 4.6 Concentração

**Concentração mássica** de um componente em uma mistura ou solução é a massa deste componente por unidade de volume da mistura ( $\text{g A/cm}^3$ ,  $\text{lbm A/ft}^3$ ,  $\text{kg A/m}^3$ , ...).

**Concentração molar** de um componente em uma mistura ou solução é o número de mols deste componente por unidade de volume da mistura ( $\text{g-mol A/cm}^3$ ,  $\text{lb-mol A/ft}^3$ ,  $\text{kg-mol A/m}^3$ ).

**Molaridade** de uma solução é o valor da concentração molar do soluto expressa em gmol soluto/litro de solução. Por exemplo, uma solução 2 molar (2 M) de A contém 2 gmol A por litro de solução.

**Vazão molar ( $n\&$ )** de um componente é expressa em número de mol ou simplesmente mol desse componente por unidade de tempo. É igual ao produto da vazão volumétrica pela concentração molar do componente.

#### 4.7 Pressão

##### a) Pressão de fluido e carga ("head") hidrostática

Uma pressão é a razão de uma força para uma área sobre a qual a força atua. Assim, as unidades de pressão são:

$$\text{Pascal, Pa} = \left( \frac{N}{m^2} \right); \quad \frac{\text{dinas}}{cm^2}; \quad \text{psi} = \left( \frac{\text{lb}_f}{in^2} \right)$$

Em vez de força por área, outra forma de expressar a pressão é através da indicação de uma altura de determinado líquido (carga ou head). A pressão é equivalente àquela exercida pela coluna hipotética de altura  $h$  desse fluido em sua base, se a pressão no topo da coluna for zero. Assim, pode-se dizer que uma pressão de  $14,7 \text{ psi} = 1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg} = 10,33 \text{ mca}$  (metros de coluna de água).

Exercício exemplo:

Qual é a pressão a 5 metros abaixo do nível da água num lago, sabendo que a densidade da água é de  $998 \text{ g/L}$ ?  $g/g_c = 9,806 \text{ N/kg}$

$$p = \rho \left( \frac{g}{g_c} \right) h = 998 \frac{\text{kg}}{m} \times 9,806 \frac{\text{N}}{\text{kg}} \times 5 \text{ m} = 48931,9 \text{ Pa}$$

##### b) Pressão atmosférica ( $p_{\text{atm}}$ ), pressão absoluta ( $p_{\text{abs}}$ ) e pressão manométrica ("gauge") ( $p_{\text{man}}$ ou $p_{\text{rel}}$ )

A pressão atmosférica pode ser entendida como a pressão na base de uma coluna de fluido (ar) localizada no ponto de medida (ao nível do mar, por exemplo). A pressão  $p_0$  no topo da coluna é igual a zero e  $\rho$  e  $g$  são valores médios de densidade do ar e aceleração de gravidade entre o topo da atmosférica e o ponto de medida. Um valor típico da pressão atmosférica ao nível do mar é  $760 \text{ mmHg}$ . Ela foi designada como pressão padrão de uma atmosfera (experiência de Torricelli).

As pressões dos fluidos, até aqui descritas são absolutas (a pressão zero corresponde ao vácuo perfeito). Muitos aparelhos de medida de pressão dão, no entanto, a pressão manométrica ("gauge") de um fluido, isto é, a pressão relativa. Uma pressão manométrica de zero indica que a pressão absoluta do fluido é igual a pressão atmosférica.

$$p_{\text{absoluta}} = p_{\text{manométrica}} \text{ ou } \text{relativa} + p_{\text{atmosférica}}$$

As abreviações **psia** ou **psig** são comumente utilizadas para denotar as pressões **absoluta** e **manométrica**, respectivamente, em termos de lbf/in<sup>2</sup> (psi). Também é comum referir-se a pressões manométricas negativas (pressões absolutas menores que a atmosférica) como quantidades positivas de vácuo. Por exemplo:

$$p_{\text{man}} = -1 \text{ inHg (que corresponde à pressão absoluta de 28,9 inHg, já que } p_{\text{atm}} = 29,9 \text{ inHg ) é chamada de 1 inHg de vácuo.}$$

Então:

$p_{\text{absoluta}} \rightarrow$  relativa ao vácuo

$p_{\text{manométrica}} \rightarrow$  relativa à atmosfera

#### 4.5 Temperatura

A temperatura de uma substância (T) em um dado estado de agregação (sólido, líquido ou gás) é uma medida da energia cinética média possuída pelas moléculas da substância. Como esta energia não pode ser medida diretamente, a T precisa ser determinada indiretamente pela medida de alguma propriedade física da substância, cujo valor depende da temperatura de uma forma conhecida. Tais propriedades e os aparelhos para medida de uma temperatura, nela baseados, incluem resistência elétrica de um condutor (termômetro de resistência), voltagem na junção de dois metais diferentes (termopar), espectro de radiação emitida (pirômetro) e volume de uma massa fixa de um fluido (termômetro).

As escalas de temperatura podem ser definidas em termos de algumas dessas propriedades, ou em termos de fenômenos físicos como o congelamento e ebulição, que ocorram a pressão e temperatura fixadas. Você poderia referir-se, por exemplo, à temperatura na qual a resistividade de um fio de cobre é  $1,92 \cdot 10^{-6}$  ohms/cm<sup>3</sup>. É conveniente ter, além dessas escalas, uma escala numérica simples entre outras razões para que não se precise usar várias palavras para expressar uma simples temperatura.

Uma escala definida de temperatura é obtida arbitrariamente, atribuindo-se valores numéricos a duas medidas reproduzíveis de temperatura. Por exemplo: atribui-se o valor 0 (zero) ao congelamento da água, e o valor 100 (cem) a ebulição a pressão de 1 atm. Além disso, estabelece-se que o comprimento do intervalo da unidade de temperatura (chamado grau) é 1/100 da distância entre os dois pontos de referência.

As duas mais comuns escalas de temperaturas que utilizam o congelamento e a ebulição da água a pressão de 1 atm são:

- Celsius (ou centígrado):  $T_f = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_b = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ . Nessa escala o zero absoluto (teoricamente a menor temperatura atingível na natureza) vale  $-273,15 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- Fahrenheit:  $T_f$  é designado por  $32 \text{ }^\circ\text{F}$  e  $T_b$  por  $212 \text{ }^\circ\text{F}$ . O zero absoluto equivale a  $-459,67 \text{ }^\circ\text{F}$ .

As escalas Kelvin e Rankine são escalas de temperaturas absolutas, na qual o zero absoluto tem o valor 0 (zero). O tamanho de um grau é o mesmo da escala Celsius para a escala Kelvin, e igual ao tamanho do grau Fahrenheit para a escala Rankine.

Assim:

$$T(\text{K}) = T(^{\circ}\text{C}) + 273,15$$

$$T(^{\circ}\text{R}) = T(^{\circ}\text{F}) + 459,67$$

$$T(^{\circ}\text{R}) = 1,8 T(\text{K})$$

$$T(^{\circ}\text{F}) = 1,8 T(^{\circ}\text{C}) + 32$$