

- VIII. Balanço de Massa

Lei da Conservação da Massa:

Também conhecida como **Lei de Lavoisier** (Antonio Lavoisier (francês) . 1774), essa lei diz que, numa **reação química** que se processe num **sistema fechado**, a massa permanece constante, ou seja, a soma das massas dos reagentes é igual à soma das massas dos produtos.

$$m_{(\text{reagentes})} = m_{(\text{produtos})} \quad (32)$$

Numa reação química, a massa se conserva, pois não ocorre criação nem destruição dos átomos. Os átomos são conservados, eles apenas se rearranjam. Os agregados atômicos dos reagentes são desfeitos e novos agregados atômicos são formados+ou, filosoficamente falando, **Í Na natureza, nada se cria, nada se perde, tudo se transforma**.

1) A equação do balanço:

Um Balanço de Massa (BM) é, simplesmente, a quantificação exata de todos os materiais que entram, saem, se geram, se consomem e se acumulam no decorrer de um intervalo de tempo determinado.

O princípio geral dos cálculos de BM é estabelecer um número de equações independentes igual ao número de incógnitas de composição e massa. Nos processos contínuos, a base de cálculo é, normalmente, a vazão de uma corrente de entrada ou saída do processo. O tipo de vazão, se mássica, volumétrica ou molar, é função da base da composição desta corrente.

Se se conhece:

- a) fração em massa → a vazão de base é a vazão mássica.
- b) fração em quantidade de matéria → a vazão de base é a vazão molar.
- c) fração em volume → a vazão de base é a vazão volumétrica.

A Figura 1 mostra o esquema de um sistema geral, que pode ser um equipamento de processo, um conjunto de equipamentos de processo ou uma unidade industrial de processo, para o qual um BM deve ser feito.

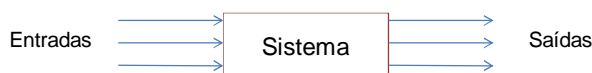


Figura 1. Sistema geral em que será aplicado um BM.

A equação abaixo mostra, de forma geral, o conceito de balanço de massa aplicável a um processo **com** ou **sem** reação química.

$$\text{Entrada} + \text{Geração} \text{ É } \text{Saída} \text{ É } \text{Consumo} = \text{Acúmulo} \quad (33)$$

obs.: Este balanço é macroscópico, isto é, só interessa a passagem de material nos limites (fronteira) do sistema.

A equação (33) pode ser aplicada a qualquer material presente no processo, ou seja, pode-se fazer o balanço tanto para a massa total do material quanto para qualquer espécie molecular ou atômica envolvida com o processo.

1.1) Características do processo:

- a) **Geração e Consumo:** se referem a processos em que ocorrem reações químicas.
- b) **Acúmulo:** significa variação de massa com o tempo no interior do processo, ou seja, sistema em estado não-estacionário. Um sistema sem acúmulo se encontra em estado estacionário.

2) Conceitos:

2.1) Balanço de massa total (BM):

Analisa os elementos do processo geral, sem se preocupar com a composição dos mesmos. Se o processo ocorre sem reação química, o balanço pode ser feito em unidades mássicas. Se ocorre com reação química, é recomendável realizá-lo em unidades molares (mol).

2.2) Balanço de massa parcial (BMP):

Analisa um só componente ou espécie química. O balanço pode ser feito em massa ou em mol. O BMP é gerado a partir do conhecimento da composição do sistema, representada, geralmente, em fração mássica ou molar.

2.3) Componente de amarração (c.a.):

Um componente de amarração é um material que passa de uma corrente para outra sem sofrer qualquer tipo de alteração ou sem que tenha sido adicionado ou retirado deste componente qualquer material semelhante.

4) Casos derivados da equação de balanço de massa (eq. 33):

4.1) BM sem reação química:

Caso 1: sem acúmulo.
$$\text{Entrada} + \overset{0}{\cancel{\text{Geração}}} \overset{0}{\cancel{=}} \overset{0}{\cancel{\text{Saída}}} \overset{0}{\cancel{=}} \overset{0}{\cancel{\text{Consumo}}} = \overset{0}{\cancel{\text{Acúmulo}}}$$

$$\boxed{\text{Entrada} = \text{Saída}}$$

Caso 2: com acúmulo.
$$\text{Entrada} + \overset{0}{\cancel{\text{Geração}}} \overset{0}{\cancel{=}} \overset{0}{\cancel{\text{Saída}}} \overset{0}{\cancel{=}} \overset{0}{\cancel{\text{Consumo}}} = \overset{0}{\cancel{\text{Acúmulo}}}$$

$$\boxed{\text{Entrada} \overset{0}{\cancel{=}} \text{Saída} = \overset{0}{\cancel{\text{Acúmulo}}}}$$

4.2) BM com reação química:

Caso 3: sem acúmulo.
$$\text{Entrada} + \overset{0}{\cancel{\text{Geração}}} \overset{0}{\cancel{=}} \overset{0}{\cancel{\text{Saída}}} \overset{0}{\cancel{=}} \overset{0}{\cancel{\text{Consumo}}} = \overset{0}{\cancel{\text{Acúmulo}}}$$

$$\boxed{\text{Entrada} + \overset{0}{\cancel{\text{Geração}}} \overset{0}{\cancel{=}} \overset{0}{\cancel{\text{Consumo}}} = \overset{0}{\cancel{\text{Saída}}}}$$

Caso 4: com acúmulo.
$$\text{Entrada} + \overset{0}{\cancel{\text{Geração}}} \overset{0}{\cancel{=}} \overset{0}{\cancel{\text{Saída}}} \overset{0}{\cancel{=}} \overset{0}{\cancel{\text{Consumo}}} = \overset{0}{\cancel{\text{Acúmulo}}}$$

Obs.: Os cálculos de balanço de massa no regime permanente (estacionário) são extremamente necessários para o dimensionamento dos equipamentos de processo e na avaliação do desempenho destes. O BM aplicado no regime transiente (não-estacionário) é fundamental na modelagem dos processos para simulação e controle automáticos dos mesmos.

5) Cálculos de BM:

5.1) Problemas com processos físicos:

Nos problemas de operações unitárias da eng^a. química como a destilação, a absorção, a extração, etc., embora sejam diferentes entre si, o método de solução do balanço material envolvido é o mesmo, pois lida-se com correntes que entram e saem do processo e com composições conhecidas e a conhecer.

- **Alimentação ou carga:** corrente principal ou única que entra no processo.
- **Produtos ou efluentes:** correntes que saem do processo.

Como regra geral, antes de iniciar os cálculos deve-se:

- 1) Fazer um esquema simplificado do processo (tipo uma caixa preta), definindo a sua fronteira pelo traçado de um envoltório;
- 2) Identificar com símbolos, as vazões e as composições das correntes envolvidas;
- 3) Anotar no esquema todos os dados disponíveis das vazões e das composições;
- 4) Verificar que composições são conhecidas ou podem ser imediatamente calculadas;
- 5) Verificar que vazões mássicas são conhecidas ou podem ser facilmente calculadas;
- 6) Selecionar a base de cálculo conveniente para o início do problema.

Só após concluídos esses procedimentos é que se deve escrever as equações de BM (total e de componente) ou esquematizar um quadro ou uma planilha contendo os componentes e as correntes do processo.

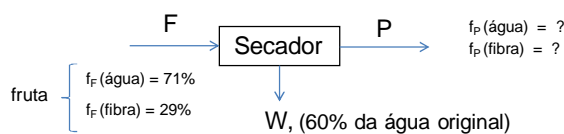
Estequiometria Industrial

68

Exemplos de BM para o caso 1:

Entrada = Saída

a) Balanço de massa num secador:



1º) Balanço de massa total:

$$F = P + W \quad (1)$$

2º) Balanço de massa parcial para a fibra:

$$F \times f_F(\text{fibra}) = P \times f_P(\text{fibra}) \rightarrow 0,29 \times F = P \times f_P(\text{fibra}) \quad (2)$$

3º) Balanço de massa parcial para a água:

$$F \times f_F(\text{água}) = P \times f_P(\text{água}) + W \times f_W(\text{água}) \quad (3)$$

Sabe-se que: $W = 0,60 (0,71 \times F)$ e $f_W(\text{água}) = 100\%$ ou 1, portanto a eq. (3) fica:

$$F \times 0,71 = P \times f_P(\text{água}) + 0,60 (0,71 \times F) \times 1 \quad (4)$$

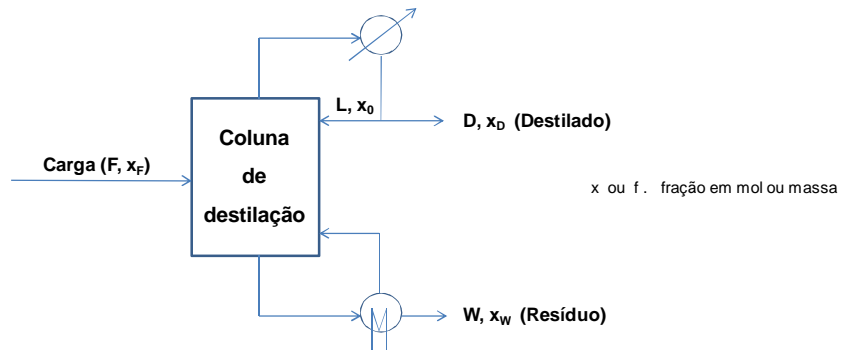
Obs.: Componente de amarração = fibra, pois está presente em menos correntes.

Estequiometria Industrial

69



b) Balanço de massa numa coluna de destilação (fracionada):

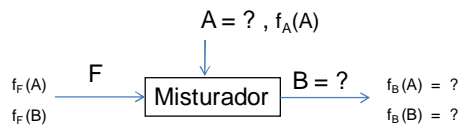


1º) Balanço de massa total: $F = D + W$ (1)

2º) Balanço de massa parcial: $F \times x_F = D \times x_D + W \times x_W$ (2)

Obs.: Podem ser formuladas 2 equações, isto significa que apenas 2 variáveis das 6 (F, x_F, D, x_D, W, x_W) podem ser desconhecidas para que o problema tenha solução.

c) Balanço de massa num misturador:



1º) Balanço de massa total: $F + A = B$ (1)

2º) Balanço de massa parcial para o componente A: $F \times f_F(A) + A \times f_A(A) = B \times f_B(A)$ (2)

3º) Balanço de massa parcial para o componente B: $F \times f_F(B) = B \times f_B(B)$ (3)

Obs.: 2 incógnitas (A e B) e 2 equações independentes (1) e (3), o problema tem solução.

Exemplos de BM para o caso 2:

$$\text{Entrada} \dot{=} \text{Saída} = \text{Acúmulo}$$

a) Sistema estacionário:

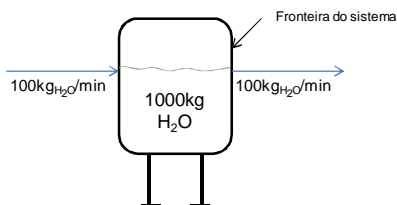


Figura 1. Sistema aberto estacionário.

Como a taxa de água alimentada é igual à taxa de água removida, a quantidade de água no tanque permanece constante (1000kg). Este sistema encontra-se em estado estacionário, pois:

- 1) As condições dentro do sistema (quantidade de água) permanecem invariáveis com o tempo;
- 2) As condições das correntes em escoamento também não variam com o tempo.

Por definição, todas as variáveis de um processo estacionário (por ex.: temperaturas, pressões, massa de material, vazões etc.) permanecem constantes no tempo. E um processo é dito contínuo, quando material entra e sai do sistema sem interrupção.

Estequiometria Industrial

72

b) Sistema não-estacionário:

Se o processo for modificado, para que a vazão de saída do sistema seja, instantaneamente, reduzida para um valor constante de $90\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{min}$, ocorrerá acúmulo no sistema conforme a figura abaixo.

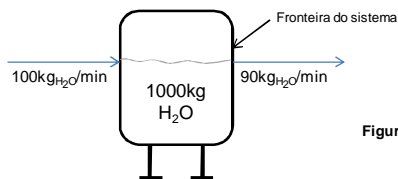


Figura 2. Condições iniciais para um sistema aberto não-estacionário com acúmulo.

Neste sistema, a água se acumula a uma taxa de $10\text{kg}/\text{min}$ ($100\text{kg}/\text{min} \dot{-} 90\text{kg}/\text{min}$). A quantidade de água presente no vaso dependerá do intervalo de tempo para o qual seja mantida a taxa de acúmulo.

O que acontece no sistema após 50min de acúmulo?

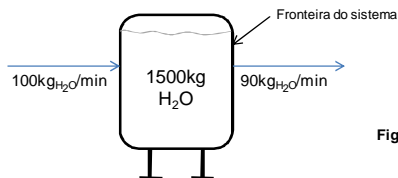


Figura 3. Sistema aberto não-estacionário com acúmulo após 50min.

50min de acúmulo a $10\text{kg}/\text{min}$ levam a 500kg de água acumulada. Como a quantidade de água no sistema varia com o tempo, o sistema encontra-se em estado não-estacionário ou transiente. Neste caso, parte ou todas as variáveis do processo e de suas correntes de entrada ou saída (por ex.: temperatura, pressão, massa de material, vazões, composição etc.) deverão estar variando no tempo.

Estequiometria Industrial

73

Supondo que a vazão de saída do sistema retorne a 100kg/min e que a vazão de alimentação seja reduzida para 90kg/min.

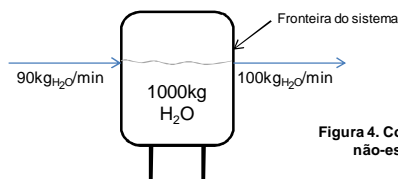


Figura 4. Condições iniciais para um sistema aberto não-estacionário com acúmulo negativo.

Observa-se que a quantidade de água no sistema diminui com o tempo a uma taxa de 10kg/min.

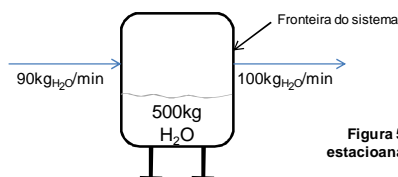


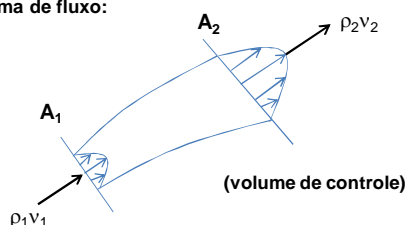
Figura 5. Condições do sistema aberto não-estacionário com acúmulo negativo após 50min.

Obs.: A equação de BM pode ser aplicada em massa, mols ou qualquer quantidade que seja conservada. Os intervalos e tempos escolhidos para as condições inicial e final podem ser quaisquer, mas, normalmente, seleciona-se um intervalo de 1 minuto ou de 1 hora, em vez de tempos específicos. Se por exemplo, adota-se uma base de 1 hora para resolver o problema, o termo acúmulo representará a soma (ou integral) de todo o material que se acumulou no sistema durante esse intervalo de tempo. A unidade do acúmulo será massa ou mols e não massa ou mols por unidade de tempo.

Estequiometria Industrial

74

1) Considere o seguinte sistema de fluxo:



O volume de controle finito consiste numa tubulação de fluxo limitada pelas seções 1 e 2, perpendiculares às linhas de corrente. Só passará fluido pelas seções 1 e 2, não havendo escoamento através das paredes. A massa específica do fluido, nas áreas A_1 e A_2 , pode ser considerada constante.

- Aplicando a equação simplificada, **Entrada = Saída = Acúmulo**, tem-se:

$$\int_{A_1} \rho_1 v_1 dA_1 - \int_{A_2} \rho_2 v_2 dA_2 = \int_V \frac{\delta \rho}{\delta t} dV \quad (1) \quad \text{(Equação da Continuidade)}$$

Como ρ_1 e ρ_2 são constantes: $\rho_1 \int_{A_1} v_1 dA_1 - \rho_2 \int_{A_2} v_2 dA_2 = \int_V \frac{\delta \rho}{\delta t} dV$

Por definição, $\int_A v dA = Q$ (vazão volumétrica)

$$\rho_1 Q_1 - \rho_2 Q_2 = \int_V \frac{\delta \rho}{\delta t} dV \quad (2)$$

Estequiometria Industrial

75

- Casos particulares da Equação da Continuidade (eq. 1):

$$\int_{A_1} \rho_1 v_1 dA_1 - \int_{A_2} \rho_2 v_2 dA_2 = \int_V \frac{\delta \rho}{\delta t} dV$$

1) Fluido compressível e escoamento estacionário:

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2 \quad (3)$$

2) Fluido incompressível e escoamento estacionário:

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad \text{ou} \quad Q_1 = Q_2 \quad (4)$$

3) Fluido incompressível e escoamento não-estacionário:

$$\rho(Q_1 - Q_2) = \int_V \frac{\delta \rho}{\delta t} dV \quad (5)$$

4) Fluido incompressível e escoamento não-estacionário:

$$\rho_1 Q_1 - \rho_2 Q_2 = \int_V \frac{\delta \rho}{\delta t} dV \quad (6)$$

O BM (eq.1) pode ser escrito em função do volume do sistema.

$$\rho_1 v_1 A_1 - \rho_2 v_2 A_2 = \frac{\delta(\rho V)}{\delta t} \quad (7)$$

Estequiometria Industrial

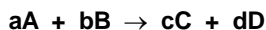
76

5.2) Problemas com processos químicos:

Para efetuar o BP de um composto que participa de um sistema com reação química, os termos geração e consumo são escritos em função de alguns fatores, específicos dos sistemas reacionantes:

- 1) Estequiometria: é a relação teórica entre os compostos envolvidos na reação.
- 2) Reagente limitante: reagente em menor proporção na alimentação com relação à estequiometria da reação. Toda análise se realiza com base nele.
- 3) Grau de conversão: percentagem do reagente limitante que reage.
- 4) Seletividade: razão entre a quantidade de matéria formada do produto desejado e a quantidade de matéria formada do produto não desejado.

Considere o seguinte reação na sua forma genérica:



Reagente limitante: A
grau de conversão: x_A

Substância	Entrada	- Consumo	+ Geração	= Saída
A	N_A^0	$(a/a) N_A^0 \cdot x_A$	0	$= N_A^0 \cdot (1 - x_A)$
B	N_B^0	$(b/a) N_A^0 \cdot x_A$	0	$= N_B^0 - (b/a) N_A^0 \cdot x_A$
C	0	0	$(c/a) N_A^0 \cdot x_A$	$= (c/a) N_A^0 \cdot x_A$
D	0	0	$(d/a) N_A^0 \cdot x_A$	$= (d/a) N_A^0 \cdot x_A$

Estequiometria Industrial

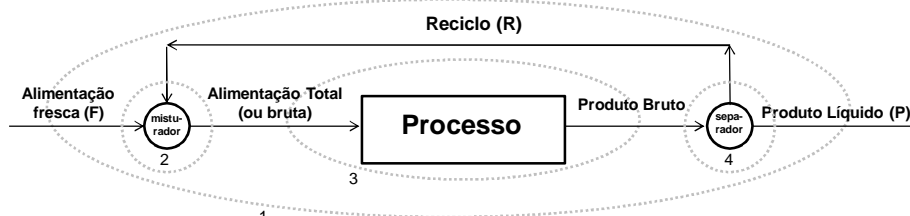
77

5.4) Problemas com processos com Reciclo:

Problemas envolvendo reciclo de correntes são, frequentemente, encontrados na indústria química e do petróleo. As correntes de reciclo são utilizadas para:

Enriquecer um produto; Aumentar rendimentos; Conservar energia e Reduzir custos operacionais.

O reciclo de material ocorre em uma variedade de processos, envolvendo reações químicas ou não.



A primeira etapa na resolução de problemas com reciclo é escolher algum(ns) bom(ns) sistema(s) para análise. Examinando a figura acima, pode-se escrever BM para vários sistemas diferentes, 4 dos quais são mostrados pelas linhas pontilhadas.

1º) BM no processo inteiro (1). Esses balanços não contêm informações sobre o reciclo. A **alimentação fresca** entra no sistema global e o **produto líquido ou global** é removido.

2º) BM no misturador (2). A alimentação fresca é combinada com a **corrente de reciclo** para produzir a **alimentação total ou bruta**. Esses balanços contêm informações sobre o reciclo.

3º) BM no próprio processo (3). Esses balanços não contêm informações sobre o reciclo. A **alimentação total (bruta)** entra no processo e o **produto bruto** é removido.

4º) BM no separador (4). O **produto bruto** é separado no reciclo e no produto global (líquido). Esses balanços contêm informações sobre o reciclo.

Estequiometria Industrial

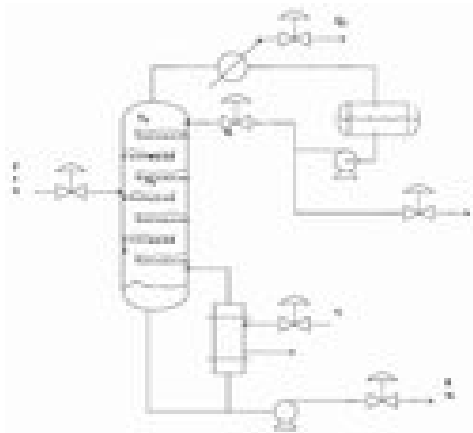
78

Os cálculos de reciclo são feitos para o **estado estacionário**, ou seja, não há perda ou acréscimo de massa no processo nem na corrente de reciclo. Pode-se fazer um BM total ou por componente em cada uma das 4 possíveis envoltórias marcadas na figura anterior.

Obs.: Apenas 3 dos 4 balanços são independentes, pois o BM total é a soma dos outros 3 balanços.

Exemplos industriais:

- **Processos físicos de separação:** são processos em que ocorrem reciclo de material que não envolvem reação química, como: **colunas de destilação** (onde parte do destilado retorna à torre como refluxo para enriquecer o destilado no componente mais leve, obtendo-se uma melhor qualidade do destilado); **secagem com ar** (parte do ar efluente do secador é reciclado, misturando-se com o ar fresco na entrada do secador, com o objetivo de manter uma alta vazão de ar no secador, aquecendo apenas o ar fresco e mantendo a umidade do ar no nível razoável).



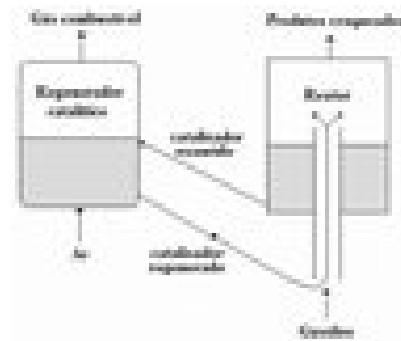
Estequiometria Industrial

79

Exemplos industriais:

- **Processos químicos de separação** : envolvem reações químicas em que ocorre, geralmente, o reciclo de reagentes, para aumentar a conversão global em um reator, pois os catalisadores são usados para aumentar as taxas de reações químicas, porém sua efetividade pode diminuir com o uso (desativação do catalisador), requerendo a regeneração local e a reciclagem do catalisador.

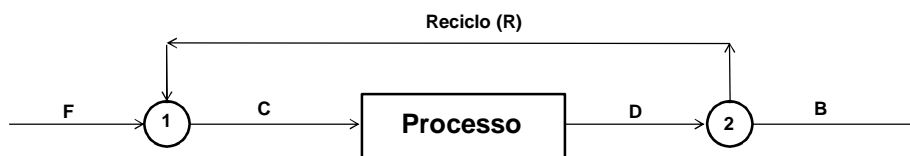
Ex.: **processos de refino de petróleo**, como craqueamento catalítico em leito fluidizado (FCC), neste caso o catalisador de craqueamento desativa quase que imediatamente quando em contato com a alimentação de gasóleo na temperatura de reação, devido à formação do coque na superfície do catalisador. Desta forma, o catalisador desativado (esgotado) é transportado para o regenerador de catalisador, onde a maioria do coque é queimada e liberada da superfície do catalisador, restaurando sua atividade.



Estequiometria Industrial

80

5.4.1) Reciclo sem reação química:



1º) Balanço de massa total:

$$F = B$$

2º) Balanço de massa parcial em (1):

$$F + R = C$$

3º) Balanço de massa parcial em (2):

$$D = R + B$$

4º) Balanço de massa parcial no processo:

$$C = D$$

Estequiometria Industrial

81

5.4.2) Reciclo com reação química:

- Dois termos aplicados para conversão são, normalmente, usados, a conversão global do processo e a conversão por passe no reator.

Conversão global: é a fração (ou porcentagem) do reagente presente na carga fresca que é convertida em produto(s) efluente(s) do processo.

$$\text{Conversão global } (f_G) = \frac{\text{massa (mols) de reagente na carga fresca} - \text{massa (mols) de reagente no produto}}{\text{massa (mols) de reagente na carga fresca}}$$

Conversão por passe: é a fração (ou porcentagem) do reagente presente na carga combinada que é convertida em produto(s) efluente(s) do reator.

$$\text{Conversão por passe } (f_P) = \frac{\text{massa (mols) de reagente no reator} - \text{massa (mols) de reagente que sai do reator}}{\text{massa (mols) de reagente no reator (carga combinada)}}$$

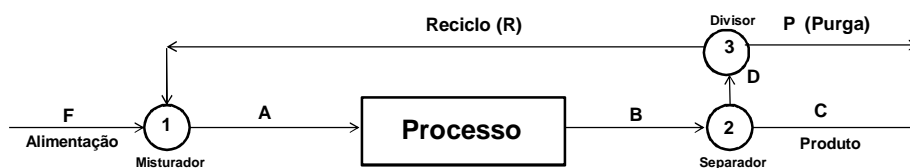
Obs.: A conversão global depende somente do que entra e do que sai do processo global, enquanto que a conversão por passe depende do que entra e do que sai do reator. Quando a alimentação fresca consiste em mais de um reagente, a conversão pode ser expressa por um simples componente, geralmente, o reagente limitante.

Estequiometria Industrial

82

5.5) Problemas com processos com Reciclo e Purga:

- Purga: corrente que sangra do processo um acúmulo de inertes ou material indesejado que, de outro modo, pode acumular ainda mais na corrente de reciclo.



1º) Balanço de massa total:

$$F = P + C$$

2º) Balanço de massa parcial em (1):

$$F + R = A$$

3º) Balanço de massa parcial em (2):

$$B = D + C$$

4º) Balanço de massa parcial em (3):

$$D = R + P$$

5º) Balanço de massa parcial no processo:

$$A = B$$

Estequiometria Industrial

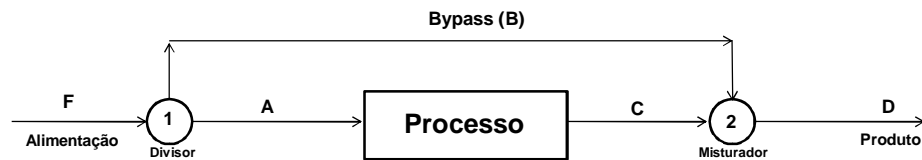
83



5.6) Problemas com processos com Bypass:

- Bypass: corrente que desvia de um ou mais estágios do processo e vai diretamente a um outro estágio a jusante.

Obs.: Uma corrente de bypass pode ser usada para controlar a composição de uma corrente final de saída de uma unidade que mistura a corrente de bypass e a corrente de saída da unidade, em proporções adequadas para obter a composição final desejada.



1º) Balanço de massa total:

$$F = D$$

2º) Balanço de massa parcial em (1):

$$F = A + B$$

3º) Balanço de massa parcial em (2):

$$D = B + C$$

4º) Balanço de massa parcial no processo:

$$A = C$$