



$$p - p\beta(V) = \sum_{i=1}^{\infty} (V_s)$$

GUSTAVO TOMAS GUTIERREZ GALO

$$\delta = \frac{\Delta \Delta}{S \Delta^z}$$

BALANÇO DE MASSA

UM OLHAR TÉCNICO



F

C

editora
itacaiúnas

GUSTAVO TOMAS GUTIERREZ GALO

BALANÇO DE MASSA: UM OLHAR TÉCNICO

1ª edição

Editora Itacaiúnas
Ananindeua - PA
2025

©2025 por Gustavo Tomas Gutierrez Galo

Todos os direitos reservados.

1ª edição

Conselho editorial / Colaboradores

Márcia Aparecida da Silva Pimentel – Universidade Federal do Pará, Brasil

José Antônio Herrera – Universidade Federal do Pará, Brasil

Márcio Júnior Benassuly Barros – Universidade Federal do Oeste do Pará, Brasil

Miguel Rodrigues Netto – Universidade do Estado de Mato Grosso, Brasil

Wildoberto Batista Gurgel – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Brasil

André Luiz de Oliveira Brum – Universidade Federal de Rondônia, Brasil

Mário Silva Uacane – Universidade Licungo, Moçambique

Francisco da Silva Costa – Universidade do Minho, Portugal

Ofélia Pérez Montero - Universidad de Oriente – Santiago de Cuba, Cuba

Editora-chefe: Viviane Corrêa Santos – Universidade do Estado do Pará, Brasil

Editor e web designer: Walter Luiz Jardim Rodrigues – Editora Itacaiúnas, Brasil

Editor e diagramador: Deividy Edson Corrêa Barbosa - Editora Itacaiúnas, Brasil

Editoração eletrônica/ diagramação: Walter Rodrigues

Projeto de capa: Walter Rodrigues

Revisão: do autor

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

G178	Galo, Gustavo Tomas Gutierrez
	Balanço de massa: um olhar técnico [recurso eletrônico] / Gustavo Tomas Gutierrez Galo. - 1. ed. – Ananindeua : Itacaiúnas, 2025. 58 p.: il.: PDF , 1,0 MB.
	Inclui bibliografia e índice. ISBN: 978-85-9535-358-9 (Ebook) DOI: 10.36599/itac-978-85-9535-358-9
	1. Engenharia química. 2. Balanço de massa. 3. Processos industriais. 4. Operações unitárias. I. Título.
	CDD 660 CDU 66

Índice para catálogo sistemático:

1. Engenharia química: 660
2. Engenharia química. Tecnologia de processos: 66

E-book publicado no formato PDF (*Portable Document Format*). Utilize software [Adobe Reader](#) para uma melhor experiência de navegabilidade nessa obra.

Todo o conteúdo apresentado neste livro é de responsabilidade do(s) autor(es).

Esta publicação está licenciada sob [CC BY-NC-ND 4.0](#)

Esta obra foi publicada pela **Editora Itacaiúnas** em setembro de 2025.



Sumário

APRESENTAÇÃO	5
CAPÍTULO 1 – O PROCESSO QUÍMICO	6
CAPÍTULO 2 – VOLUME DE CONTROLE	9
CAPÍTULO 3 – BALANÇO DE MASSA.....	11
CAPÍTULO 4 – BALANÇO DE MASSA EM SISTEMAS FÍSICOS	14
CAPÍTULO 5 – CONCEITOS BÁSICOS DE ESTEQUIOMETRIA	37
CAPÍTULO 6 - BALANÇO DE MASSA EM SISTEMAS QUÍMICOS	39
REFERÊNCIAS	57

APRESENTAÇÃO

Este trabalho, intitulado “Balanço de Massa: Um Olhar Técnico”, é um e-book abrangente e didático, escrito por Gustavo Tomas Gutierrez Galo, que aborda os fundamentos e aplicações do balanço de massa em processos químicos e industriais.

Organizado em capítulos progressivos, o conteúdo parte de conceitos básicos: como a definição de processos químicos, classificação de regimes de operação e representação gráfica por meio de diagramas até chegar a tópicos avançados, como balanços de massa em sistemas com reação química, reciclo, purga e by-pass.

O texto combina teoria e prática, com explicações claras, equações fundamentais e uma série de exercícios resolvidos que ilustram a aplicação dos conceitos em situações reais da engenharia química, de alimentos, ambiental e de processos.

Destinado a estudantes e profissionais da área, este material serve como uma ferramenta essencial para o entendimento e a modelagem de processos, enfatizando a importância do balanço de massa para o dimensionamento, controle e otimização de sistemas industriais.

CAPÍTULO 1 – O PROCESSO QUÍMICO

A engenharia química, assim como diversas áreas das engenharias de processos, se ocupa fundamentalmente da análise, projeto, operação e otimização de sistemas que transformam matérias-primas em produtos de maior valor agregado. Essa transformação pode envolver alterações físicas, químicas ou biológicas, mas em todos os casos ela ocorre por meio de um processo. A compreensão clara do que constitui um processo, de como ele pode ser representado e analisado, é condição essencial para qualquer abordagem de engenharia voltada à produção em escala industrial.

Em termos conceituais, um processo pode ser definido como um conjunto ordenado de operações e fenômenos que transformam matéria-prima (entradas) em produtos (saídas), obedecendo a leis físicas e princípios da termodinâmica, balanços de massa e energia, e cinética, entre outros. No contexto industrial, as transformações são implementadas dentro de equipamentos, por sua vez conectados por meio de tubulações, formando o que se conhece como uma planta de processo.

É importante reconhecer que, apesar da diversidade dos processos existentes, eles podem ser classificados conforme diversos critérios operacionais e estruturais. Uma das classificações mais importantes é quanto ao critério de entrada e/ou saída de massa no processo. Nesse sentido, destacam-se três grandes categorias: processos em batelada, processos contínuos e processos semi-contínuos.

Os processos descontínuos (batelada ou *batch*) são aqueles nos quais uma quantidade fixa de material é processada em ciclos. Primeiramente, a unidade de operação é carregada com a matéria-prima, o processo ocorre durante um intervalo de tempo definido (com ou sem intervenção manual), e o produto é então descarregado. Em seguida, um novo ciclo pode ser iniciado. Esse tipo de processo é comum na indústria farmacêutica, na produção de alimentos e na manufatura de produtos de alto valor agregado em pequenos volumes.

Por outro lado, os processos contínuos funcionam com fluxo constante de materiais. As matérias-primas entram continuamente no sistema e os produtos são gerados simultaneamente em regime estacionário. Isso significa que as propriedades das correntes (como vazão, temperatura, composição) permanecem aproximadamente constantes ao longo do tempo, após o período inicial de estabilização. Processos contínuos são preferidos na indústria de grande escala,

como na petroquímica ou na fabricação de cimento, justamente por sua eficiência, facilidade de controle automatizado e economia de escala.

Já os processos semi-contínuos mesclam características dos dois anteriores. Por exemplo, é comum em indústrias de alimentos encontrar reatores que operam de forma contínua, mas utilizam tanques de estocagem em batelada para facilitar a logística de carregamento e distribuição.

Além dessa classificação, um processo também pode ser caracterizado pelo seu regime de operação, que determina o comportamento dinâmico das variáveis ao longo do tempo. Dois regimes principais são reconhecidos: o regime permanente (ou estacionário) e o regime transiente (ou variado).

Em regime permanente, as variáveis que descrevem o sistema (temperatura, vazão, concentração e pressão) não se alteram com o tempo. Embora o sistema possa ter entradas e saídas, essas ocorrem de maneira constante, e a condição estacionária permite que se apliquem simplificações matemáticas poderosas, especialmente nos balanços de massa e energia.

Já o regime transiente ocorre quando há variação temporal dessas variáveis. Essa condição é típica durante partidas, paradas, perturbações operacionais, ou em processos naturalmente não estacionários, como a fermentação ou a secagem intermitente. Nesses casos, a modelagem exige o uso de equações diferenciais dependentes do tempo, e a análise costuma ser mais complexa, mas igualmente necessária para garantir segurança, controle e desempenho do processo.

Representação do processo

Para estudar, projetar ou comunicar um processo industrial, é essencial utilizar representações gráficas que facilitem o entendimento de sua estrutura. A mais tradicional dessas representações é o diagrama de blocos de processo, uma ferramenta visual que permite mapear, de maneira simplificada e funcional, os principais elementos que compõem o sistema produtivo.

Nesse diagrama, os equipamentos e operações unitárias são representados por blocos retangulares, enquanto as setas indicam o fluxo de materiais entre esses blocos. Cada fluxo, chamado de corrente de processo, pode ser rotulado com informações relevantes, como vazão mássica ou volumétrica, composição, temperatura, pressão e fase (sólido, líquido, gás).

A elaboração de um diagrama de blocos segue certas convenções que ajudam a padronizar a leitura e interpretação. Os blocos devem ser dispostos de forma lógica, geralmente da esquerda para a direita, seguindo o sentido da produção.

Equipamentos de mesmo tipo devem ser representados de forma consistente, e o detalhamento pode variar conforme o nível de abstração desejado: desde diagramas conceituais, com poucos elementos, até diagramas mais completos que incluem utilidades, reciclos e subprodutos.

O diagrama de blocos é, portanto, uma ferramenta essencial não apenas na fase de projeto, mas também na operação e no controle do processo. Ele permite, por exemplo, realizar uma análise preliminar dos balanços de massa ao longo da planta, identificar pontos críticos de operação, localizar gargalos e propor melhorias. Em ambientes industriais, esses diagramas são frequentemente integrados a softwares de simulação, que possibilitam estimativas detalhadas de comportamento sob diferentes condições operacionais.

Além dos diagramas de blocos, outras representações gráficas também são utilizadas, como os fluxogramas de processo (PFD – *process flow diagram*), que detalham com mais precisão os equipamentos, e os diagramas de engenharia (P&ID – *piping and instrumentation diagram*), que representam tubulações, instrumentos e controle. Esses últimos são fundamentais em fases mais avançadas do projeto, mas, para fins de análise de balanço de massa e energia, o diagrama de blocos continua sendo a base conceitual mais importante.

CAPÍTULO 2 – VOLUME DE CONTROLE

Ao estudar ou projetar qualquer processo físico ou químico, uma das primeiras decisões que o engenheiro precisa tomar é a escolha do escopo da análise. Em outras palavras, é necessário definir claramente a “porção do universo” que será observada, descrita e quantificada. Essa porção recebe o nome de volume de controle, e sua correta definição é crucial para a aplicação dos princípios de conservação da massa, energia e quantidade de movimento, pilares fundamentais da engenharia de processos.

O volume de controle é uma região do espaço escolhida arbitrariamente pelo analista ou projetista, com o objetivo de investigar o comportamento de um processo em termos quantitativos. É importante que essa região do espaço adotada, delimite com clareza a fronteira entre o “dentro” (sistema) e o “fora” (ambiente), de modo que seja possível rastrear o que entra, o que sai e o que se acumula.

Para fins práticos, o volume de controle pode coincidir com um equipamento, como um reator ou uma torre de destilação, com uma seção específica de uma tubulação, com uma unidade de mistura, ou até mesmo com uma planta inteira, dependendo da escala e do foco do estudo.

Escolher corretamente o volume de controle é tão essencial quanto entender o fenômeno em si. Uma má escolha pode levar a balanços incorretos, conclusões equivocadas e decisões de projeto inadequadas. Em contrapartida, uma boa escolha simplifica a análise, permite a identificação clara das variáveis relevantes, e muitas vezes reduz significativamente a complexidade matemática da modelagem.

Por exemplo, suponha que se deseje realizar o balanço de massa em um trocador de calor. Há duas formas principais de abordar a situação:

- 1) definir o volume de controle como o interior de uma das serpentinas, acompanhando apenas o fluido quente,
- 2) considerar o equipamento inteiro, incluindo fluido quente e frio, sem se preocupar com os detalhes internos da geometria.

Ambas as escolhas são válidas, mas a conveniência de uma ou outra depende do objetivo da análise: controle térmico, dimensionamento hidráulico ou análise energética integrada.

Critérios para seleção de um volume de controle

Para realizar um balanço eficiente, o engenheiro deve observar alguns critérios práticos ao selecionar o volume de controle ideal:

- Cobertura de fenômenos relevantes: o volume escolhido deve englobar todos os processos que afetam diretamente o que se deseja medir ou controlar (reações, trocas térmicas, separações, misturas).
- Acessibilidade de dados: o volume deve ser tal que as condições nas superfícies de entrada e saída possam ser mensuradas ou estimadas com precisão razoável.
- Simplicidade matemática: volumes com geometria simples ou com comportamento simétrico facilitam a aplicação das leis de conservação.
- Relevância operacional: o volume deve ter correspondência direta com elementos reais do processo (um reator, uma coluna, uma tubulação), facilitando a interpretação prática dos resultados.

CAPÍTULO 3 – BALANÇO DE MASSA

O balanço de massa é uma das ferramentas fundamentais na engenharia química, engenharia de processos, ambiental, alimentos e diversas outras áreas das ciências exatas e aplicadas. Ele parte de um princípio físico inegociável: a massa não é criada nem destruída. Essa premissa, por simples que pareça, é a base para o dimensionamento, controle, otimização e segurança de praticamente todos os processos industriais.

Na prática, o balanço de massa permite ao engenheiro quantificar, prever e controlar as transformações de matéria dentro de um volume de controle. Mais do que isso, o balanço de massa é a ponte entre o comportamento físico e a modelagem matemática de processos reais.

Princípio da Conservação da Massa

A formulação matemática do balanço de massa baseia-se no princípio da conservação da massa, que afirma que a massa total de um sistema permanece constante ao longo do tempo, mesmo se houver reações químicas que transformem espécies, mas sem alterar a massa total do sistema.

A equação geral para um volume de controle arbitrário:

$$\frac{dm_{sist}}{dt} = \sum \dot{m}_{ent} - \sum \dot{m}_{sai} \pm \dot{m}_{prod/cons}$$

Se não houver geração ou consumo de massa, ou seja, numa situação em que não há reação química envolvida, essa equação se reduz a:

$$\frac{dm_{sist}}{dt} = \sum \dot{m}_{ent} - \sum \dot{m}_{sai}$$

Nos casos em que, além de não existir reação química, o sistema operar em regime permanente, ou seja, sem variação de massa acumulada ao longo do tempo ($\frac{dm_{sist}}{dt} = 0$), a equação se simplifica ainda mais:

$$\sum \dot{m}_{ent} = \sum \dot{m}_{sai}$$

Essa versão é largamente aplicada na engenharia de processos, especialmente quando se trata de operações em estado estacionário, como destilação, extração, secagem, bombeamento, entre outras.

Balanco de massa total e parcial

O balanço de massa pode ser formulado de maneira total, considerando toda a massa do sistema como um todo, ou de forma parcial, considerando uma ou mais espécies químicas de forma isolada.

Balanco de massa total

No balanço total, não se faz distinção entre os diferentes componentes do sistema. O foco está na massa global, independentemente de sua natureza ou composição química. É uma abordagem útil para verificações iniciais de consistência, cálculos de vazão total, acúmulo e descarte.

Se 100 kg/h de matéria-prima entram em um misturador, e 5 kg/h ficam acumulados temporariamente no tanque, espera-se que 95 kg/h saiam. Isso é um balanço de massa total.

Balanco de massa parcial

Quando se deseja acompanhar uma espécie química específica, como o etanol em uma fermentação, a sacarose em um tanque de dissolução, ou o oxigênio em um reator biológico, aplica-se o balanço parcial, baseado na fração mássica ou molar da substância em cada corrente.

A equação geral continua a mesma, mas a massa envolvida se refere apenas à quantidade da espécie de interesse. Esse tipo de balanço é indispensável em processos com múltiplos componentes, onde se deseja controlar concentração, pureza, rendimento ou conversão.

Aplicações práticas do balanço de massa

O balanço de massa está presente em praticamente todas as etapas de um processo industrial, desde o projeto inicial até a operação diária e o controle de qualidade. Abaixo estão alguns exemplos clássicos:

- Projeto de equipamentos: dimensionamento de tanques, tubulações, reatores e trocadores de calor.

- Análise ambiental: rastreamento de contaminantes, cálculo de emissões, eficiência de tratamento.
- Indústria de alimentos: controle de concentração de açúcares, gorduras, proteínas em processos de mistura e separação.
- Indústria química: determinação de conversão em reatores, balanço de reagentes e produtos, controle de reciclo.

Análise de graus de liberdade

Antes de resolver qualquer sistema de balanços de massa, é essencial avaliar se o número de equações disponíveis é suficiente para resolver todas as incógnitas. Esse procedimento é conhecido como análise de graus de liberdade e é parte fundamental da modelagem de processos.

Define-se o grau de liberdade (GL) como:

$$GL = ND - NEC - NR$$

onde ND é o número de variáveis desconhecidas, NEC é o número de equações independentes e conhecidas e NR é o número de relações entre as variáveis desconhecidas.

Alguns resultados são possíveis para esse cálculo, e geram algumas interpretações

- Se $GL = 0$, o sistema é bem determinado e pode ser resolvido diretamente.
- Se $GL > 0$, o sistema está subdeterminado; é necessário mais dados (condições adicionais, medidas experimentais, suposições).
- Se $GL < 0$, o sistema está superdeterminado; há equações redundantes ou inconsistentes.

A correta contagem de variáveis e equações é um exercício lógico que exige atenção à natureza do sistema. Por exemplo, se há reações químicas, essas devem ser traduzidas em equações de balanço estequiométrico; se há separações por fases, as leis de partição podem ser incluídas como equações adicionais.

CAPÍTULO 4 – BALANÇO DE MASSA EM SISTEMAS FÍSICOS

O balanço de massa aplicado a sistemas físicos é uma das mais importantes ferramentas analíticas e operacionais na engenharia. Embora o conceito seja o mesmo apresentado nos capítulos anteriores, sua aplicação a sistemas reais envolve uma complexidade maior.

Isso ocorre porque os sistemas físicos muitas vezes apresentam múltiplas entradas e saídas, comportamentos dinâmicos, interações entre fases, transformações químicas ou bioquímicas e geometrias complexas.

Natureza dos sistemas físicos

Um sistema físico, no contexto do balanço de massa, refere-se a qualquer processo em que as espécies químicas permanecem inalteradas em termos de identidade molecular, mas passam por modificações em suas condições físicas, distribuição ou estado. Exemplos clássicos de sistemas físicos incluem:

- Mistura de líquidos miscíveis (como água e etanol)
- Separação sólido-líquido (filtração)
- Evaporação de soluções aquosas
- Secagem de sólidos úmidos
- Decantação de fases imiscíveis
- Extração líquido-líquido
- Absorção física de gases em líquidos
- Trocas de calor com mudança de fase, sem reação envolvida

Esses processos ocorrem em equipamentos como tanques, evaporadores, condensadores, colunas de absorção física, secadores rotativos, ciclones, decantadores, entre outros.

Aplicação do balanço de massa

A formulação do balanço de massa em sistemas físicos baseia-se na equação geral da conservação da massa, conforme discutido nos capítulos anteriores. Um procedimento prático de sua aplicação, geralmente exige a seguinte sequência:

- Escolha do volume de controle
- Identificação das correntes de entrada e saída

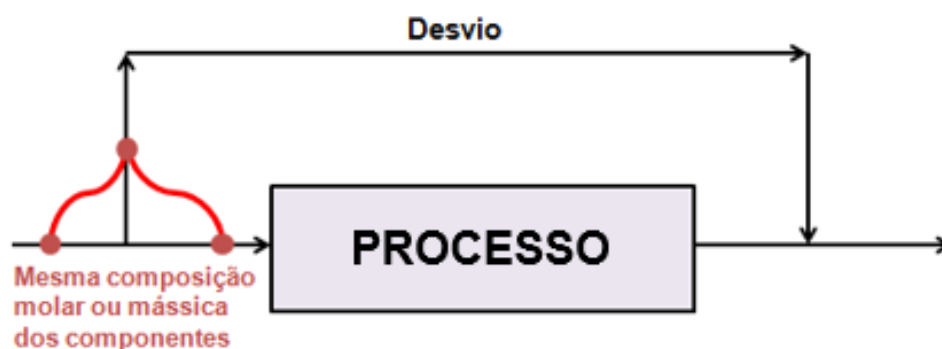
- Classificação do regime de operação (permanente ou transiente)
- Formulação matemática do balanço
- Resolução algébrica ou numérica do sistema de equações

Processos com *by-pass* (desvio)

Em muitas operações industriais, é comum a adoção de esquemas com *by-pass*, também chamados de linhas de desvio ou fluxos de derivação, nos quais parte de uma corrente de processo contorna uma ou mais etapas unitárias, sendo redirecionada diretamente para um ponto posterior do sistema. Este artifício, embora aparentemente simples, representa uma estratégia de engenharia extremamente relevante, tanto do ponto de vista operacional quanto de controle de processo.

O *by-pass* é utilizado com diversos propósitos. Em muitos casos, seu objetivo principal é ajustar propriedades físicas ou químicas de uma corrente final, por meio da mistura entre frações processadas e não processadas de uma mesma substância. Em outras situações, o desvio é empregado como alternativa de controle de temperatura, concentração, pressão ou tempo de residência no processo. Independentemente da motivação, sua presença altera significativamente a configuração do balanço de massa e deve ser tratada com cuidado na modelagem e resolução de problemas.

Importante notar que, em processos com *by-pass*, a composição química da corrente desviada é idêntica à da corrente principal antes do ponto de divisão, pois o desvio ocorre antes de qualquer transformação física significativa.



Portanto, se uma solução entra em um misturador com 10% de umidade e 1000 kg/h, e 30% dessa massa é desviada antes de passar pelo secador, o desvio de 300 kg/h terá exatamente os mesmos 10% de umidade.

Do ponto de vista do balanço de massa, a presença de um *by-pass* implica uma divisão explícita da corrente em dois ramos, exigindo que se escrevam equações separadas para cada fração. Em geral, a fração desviada não sofre transformação, enquanto a fração processada pode ter propriedades alteradas (teor de umidade, concentração, temperatura, etc.).

Processos sem reação com reciclo

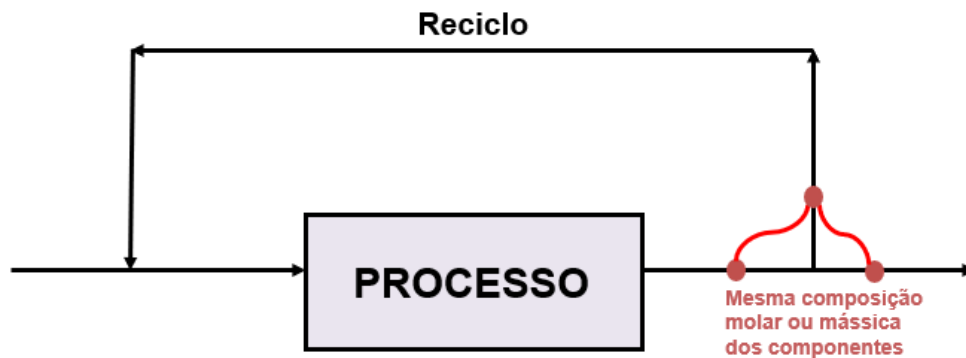
Em sistemas industriais complexos, a operação com reciclo é uma estratégia amplamente utilizada com o objetivo de otimizar recursos, melhorar o controle do processo e ajustar as condições operacionais para maximizar a eficiência do sistema.

Embora muitas vezes associada a processos com reações químicas, como na recirculação de reagentes não convertidos, a prática do reciclo também se aplica com grande relevância a processos físicos.

O reciclo em processos sem reação é adotado principalmente quando há uma etapa de separação ou beneficiamento cujo rendimento não é total, ou cuja operação em uma única passagem não resulta no produto desejado com a especificação necessária. Assim, parte da corrente de saída é retornada ao início do processo, de modo a ser processada novamente em conjunto com a alimentação fresca. Isso evita desperdício de matéria-prima, aumenta a taxa de recuperação do componente de interesse e permite a operação em condições de regime estacionário, com maior estabilidade operacional.

Um exemplo clássico ocorre em unidades de secagem de partículas ou grãos, nas quais nem toda a umidade é removida de maneira uniforme em uma única passagem pelo secador. A fração que permanece com umidade acima da especificação pode ser separada, por meio de um ciclone ou peneira vibratória, e reciclada ao ponto de entrada do secador. Esse arranjo garante que o produto final atenda às exigências de qualidade, sem que se perca material parcialmente tratado.

Importante notar que, em processos com reciclo, a composição química da corrente que saiu do processo de transformação, é idêntica à da corrente reciclada. Além disso, a composição química da corrente reciclada será, invariavelmente, distinta da corrente de alimentação fresca, pois se trata de uma fração que passou por uma ou mais unidades de processo.



O dimensionamento de unidades com reciclo exige uma análise combinada do balanço de massa total e parcial, bem como do grau de liberdade do sistema, uma vez que a adição de uma corrente interna aumenta o número de variáveis que devem ser determinadas para resolver o sistema completamente.

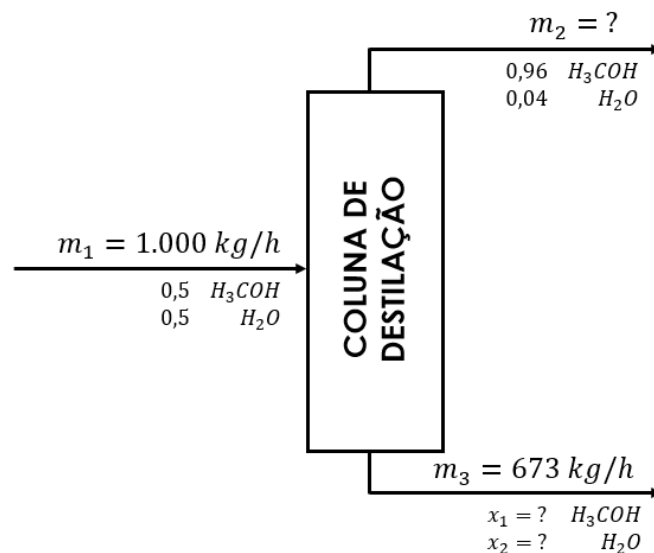
EXERCÍCIOS

Balanço de massa

EX1 Destilam-se continuamente 1000 kg/h de uma mistura contendo partes iguais (em massa) de metanol e água. As correntes de produto saem pelo topo e pelo fundo da coluna de destilação. A vazão da corrente de produto do fundo é de 673 kg/h, enquanto que a corrente de produto do topo contém 96 % (em massa) de metanol.

a) Desenhe e rotule o diagrama de blocos.

Resolução



b) Calcule a vazão, em massa, da corrente de topo.

Resolução

Como a informação pedida é sobre uma corrente de processo, para isso deve-se aplicar o balanço de massa total (BMT), considerando estado estacionário

$$\begin{aligned}\dot{m}_1 &= \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \\ 1000 &= \dot{m}_2 + 673 \\ \dot{m}_2 &= 1000 - 673 \\ \dot{m}_2 &\cong 327 \text{ kg/h}\end{aligned}$$

c) Calcule a composição, em massa, da corrente de fundo.

Resolução

Como a informação pedida é sobre substâncias presentes dentro de uma corrente de processo, para isso deve-se aplicar o balanço de massa parcial (BMP)

Escrevendo primeiramente o balanço de massa parcial para o metanol

$$\begin{aligned}\dot{m}_{\text{metanol}_1} &= \dot{m}_{\text{metanol}_2} + \dot{m}_{\text{metanol}_3} \\ w_{\text{metanol}_1} \cdot \dot{m}_1 &= w_{\text{metanol}_2} \cdot \dot{m}_2 + w_{\text{metanol}_3} \cdot \dot{m}_3 \\ 0,5 \cdot 1000 &= 0,96 \cdot \dot{m}_2 + w_{\text{metanol}_3} \cdot 673 \\ 500 &= 0,96 \cdot 327 + w_{\text{metanol}_3} \cdot 673 \\ 500 &= 313,92 + w_{\text{metanol}_3} \cdot 673 \\ w_{\text{metanol}_3} \cdot 673 &= 500 - 313,92 \\ w_{\text{metanol}_3} \cdot 673 &= 186,08 \\ w_{\text{metanol}_3} &= \frac{186,08}{673} \\ w_{\text{metanol}_3} &\cong 0,276 \cong 27,6 \%\end{aligned}$$

Escrevendo agora o balanço de massa parcial para a água

$$\begin{aligned}\dot{m}_{\text{água}_1} &= \dot{m}_{\text{água}_2} + \dot{m}_{\text{água}_3} \\ w_{\text{água}_1} \cdot \dot{m}_1 &= w_{\text{água}_2} \cdot \dot{m}_2 + w_{\text{água}_3} \cdot \dot{m}_3 \\ 0,5 \cdot 1000 &= 0,04 \cdot \dot{m}_2 + w_{\text{água}_3} \cdot 673 \\ 500 &= 0,04 \cdot 327 + w_{\text{água}_3} \cdot 673 \\ 500 &= 13,08 + w_{\text{água}_3} \cdot 673 \\ w_{\text{água}_3} \cdot 673 &= 500 - 13,08\end{aligned}$$

$$w_{\text{água}_3} \cdot 673 = 486,92$$

$$w_{\text{água}_3} = \frac{486,92}{673}$$

$$w_{\text{água}_3} \cong 0,723 \cong 72,3 \%$$

Em específico para correntes de composição binária, sabe que a soma das composições deve ser unitária. Assim, calculado a composição de metanol no fundo, para encontrar a da água, poderia ser feito

$$w_{\text{água}_3} + w_{\text{metanol}_3} = 1$$

$$w_{\text{água}_3} + 0,276 = 1$$

$$w_{\text{água}_3} = 1 - 0,276$$

$$w_{\text{água}_3} \cong 0,723 \cong 72,3 \%$$

EX2 Uma corrente de 1000 kg/h composta de mistura de benzeno e tolueno contendo 50 % em peso de benzeno é separada por destilação contínua em duas frações. A vazão mássica de benzeno na corrente do topo é 450 kg/h e a de tolueno na corrente de fundo é de 475 kg/h. A operação se desenvolve no estado estacionário. Determine as vazões mássicas de tolueno na corrente de topo e de benzeno na corrente de fundo. Resp.: 25 kg tolueno/h e 50 kg benzeno/h

EX3 Duas misturas metanol-água estão contidas em recipientes separados. A primeira mistura contém 40 % em peso de metanol e a segunda contém 70 %. Se 200 g da primeira mistura são combinados com 150 g da segunda mistura, quais são a massa e a composição do produto obtido? Resp.: 350 g e 0,529 g metanol/g

EX4 Deseja-se produzir uma solução de cloreto de sódio a 40 %. Para isso dispõe-se de dois tanques: o tanque A que contém uma solução de cloreto de sódio a 70 % e o tanque B que contém água destilada. Para atender a demanda, devem ser produzidos, por hora, 4 toneladas de solução, na composição claramente especificada. Calcule a taxa na qual deve ser bombeada cada uma das substâncias dos tanques. Resp.: 2285,714 kg/h do tanque A e 1714,286 kg/h do tanque B

EX5 A carga de uma torre de destilação é uma mistura de benzeno e tolueno com teor de 40 % molar de benzeno. Deseja-se recuperar 90 % de benzeno destilado, que contém 92,5 % de benzeno. Pretende-se produzir 500 kg/dia de benzeno na corrente de destilado. Calcule as vazões molares da corrente de alimentação, destilado e fundo. Resp.: 17,8 kmol/dia, 6,9 kmol/dia e 10,9 kmol/dia.

EX6 Uma unidade industrial realiza a preparação de uma solução salina por meio da mistura de duas correntes líquidas distintas. A primeira corrente, proveniente de um reservatório de solução diluída, apresenta uma concentração de 8 % em massa de sal e é alimentada ao processo a uma taxa constante de 500 kg/h. A segunda corrente, oriunda de uma linha de reaproveitamento de concentrados, possui concentração de 20 % em massa de sal e alimenta o sistema à razão de 300 kg/h. As duas correntes são misturadas em um tanque agitado contínuo, sem que ocorra qualquer tipo de reação ou troca de fase, formando uma única saída homogênea. Considerando que a mistura é completa e que não há perdas nem acúmulo de massa no sistema, pede-se que se determine, com base nos princípios do balanço de massa, a vazão mássica total da corrente de saída e a concentração final de sal, expressa em percentual mássico, na solução que sai do misturador. Resp.: 800 kg/h, 12,5 %

EX7 Em um processo de desidratação contínua, um alimento sólido úmido entra em um secador com um teor de umidade de 65 %. Após atravessar o secador, o mesmo produto é descarregado com umidade reduzida para 10 %. A vazão mássica de entrada do produto úmido é de 1200 kg/h, e o sistema opera em regime permanente, sem formação de subprodutos ou perdas de material. Com essas informações, deseja-se calcular a quantidade de água efetivamente retirada no processo de secagem, em kg/h, bem como a vazão do produto seco na saída do equipamento. Resp.: 733,333 kg/h, 466,667 kg/h

EX8 Em um sistema de concentração por evaporação, uma corrente líquida contendo 5 % em massa de um soluto não volátil é alimentada continuamente a um evaporador à razão de 1000 kg/h. Durante o processo, ocorre a remoção de parte da água da mistura por meio de vaporização, sem que o soluto sofra alteração química ou perda por arraste. Ao final da etapa de evaporação, obtém-se uma solução concentrada contendo 25 % em massa do mesmo soluto. Considerando que o sistema opera em

estado estacionário, pede-se que se determine a quantidade de água que foi efetivamente evaporada, em kg/h, e a vazão mássica da corrente de saída da solução concentrada. Resp.: 800 kg/h, 200 kg/h

EX9 Uma indústria de produtos químicos dilui uma solução concentrada de ácido sulfúrico utilizando água pura em um misturador contínuo. A corrente concentrada de ácido apresenta 65 % em massa de H_2SO_4 . Após a mistura, obtém-se uma corrente final com concentração igual a 40 % em massa de H_2SO_4 . A vazão mássica de entrada da solução concentrada é de 500 kg/h, e o sistema opera sem perdas, sem reações químicas e sem acúmulo de massa. Deseja-se determinar a vazão mássica de água adicionada no processo de diluição para que se obtenha a composição desejada na corrente de saída. Resp.: 312,5 kg/h

EX10 Em uma planta de produção de refrigerantes, uma solução de xarope concentrado contendo 60 % de sólidos solúveis é diluída com água potável para formar uma bebida pronta para envase, cuja composição desejada é de 12 % de sólidos. A mistura ocorre em uma câmara agitada, de forma contínua e sem perdas. Sabe-se que a taxa de alimentação da água é de 1500 kg/h. Determine a vazão mássica de xarope concentrado que deve ser alimentada ao sistema para se obter a composição final desejada. Resp.: 375 kg/h

EX11 Uma corrente de alimentação contendo uma mistura líquida de etanol e água entra em uma coluna de destilação para separação parcial dos componentes. A coluna separa essa corrente em duas saídas: uma corrente de topo rica em etanol (com 90 % de etanol em massa), cuja vazão é de 400 kg/h, e uma corrente de fundo rica em água, com 95 % de água, cuja vazão é de 800 kg/h. Assumindo que o sistema opera em regime estacionário, determine a composição mássica de etanol na corrente de alimentação. Resp.: 33,3 %

EX12 Um tanque de mistura recebe duas correntes simultâneas: a primeira transporta 200 kg/h de uma solução de cloreto de sódio com concentração de 15 % em massa, e a segunda fornece 300 kg/h de uma solução mais diluída, contendo apenas 4 % de cloreto de sódio. A mistura completa ocorre dentro do tanque e, a partir dele, sai uma única corrente homogênea. Considerando que o sistema opera em regime

permanente, determine a porcentagem mássica de cloreto de sódio na corrente de saída do sistema. Resp.: 8,4 %

EX13 Em uma linha de produção de produtos cosméticos, uma corrente contendo 500 kg/h de uma emulsão com 10 % de óleo essencial é misturada a uma outra corrente, de menor concentração, com vazão de 700 kg/h e apenas 2 % de óleo essencial em massa. Ambas as correntes são encaminhadas a um tanque de mistura contínuo, de onde sai uma corrente única com composição homogênea. Supondo que o sistema opere em regime permanente, determine a composição da mistura final, ou seja, a porcentagem mássica de óleo essencial na corrente de saída. Resp.: 5,3 %

EX14 Em uma linha de formulação de bebidas, deseja-se produzir uma solução final contendo 6 % em massa de suco concentrado. Essa solução é obtida a partir da mistura entre uma corrente de água pura e uma corrente de suco concentrado contendo 30 % de sólidos solúveis. Sabe-se que a corrente de saída, com composição final já ajustada, é produzida a uma vazão constante de 1500 kg/h. Considerando que não há reações e perdas, determine qual deve ser a vazão mássica da corrente de suco concentrado que entra no sistema, bem como a quantidade de água adicionada na diluição, para atingir a composição final desejada. Resp.: 300 kg/h, 1200 kg/h

EX15 Uma fábrica de cosméticos prepara uma emulsão contendo 12% em massa de extrato vegetal. Essa emulsão é obtida a partir da mistura entre duas correntes: uma contendo 20 % de extrato e outra com concentração desconhecida. Ambas as correntes são alimentadas ao sistema na mesma proporção de vazão mássica, ou seja, com vazões iguais. A mistura ocorre em regime permanente, com saída contínua e homogênea. Determine qual é a porcentagem de extrato na segunda corrente de entrada. Resp.: 4 %

EX16 Uma solução aquosa de cloreto de cálcio é obtida em um processo de diluição contínua. A corrente final, que sai de um tanque agitado em regime estacionário, tem vazão mássica de 1000 kg/h e concentração de 18 % de cloreto de cálcio. Essa solução é formada a partir da mistura de uma corrente de água pura com outra corrente de solução concentrada contendo 45 % de cloreto de cálcio. Determine qual deve ser a vazão mássica da corrente de solução concentrada e de água pura que

entram no sistema para que se obtenha a composição final desejada. Resp.: 400 kg/h, 600 kg/h

EX17 Em uma indústria alimentícia, realiza-se o processo de concentração de uma solução de suco de fruta por evaporação. Uma corrente de entrada com concentração desconhecida de sólidos solúveis é alimentada a um evaporador. Nesse equipamento, parte da água é removida por vaporização, sem perda de sólidos. O evaporador opera com vazão de entrada de 2000 kg/h e produz duas saídas: uma corrente de concentrado contendo 45 % de sólidos, com vazão de 700 kg/h, e uma corrente de vapor de água com composição desprezível de sólidos. Considerando que não há reações químicas nem perdas no processo, determine a composição inicial da corrente de entrada (percentual mássico de sólidos), bem como a quantidade de água evaporada por hora. Resp.: 15,7 %, 1300 kg/h

EX18 Um sistema de filtração industrial opera com duas correntes de entrada: uma corrente de polpa aquosa contendo 25 % de sólidos suspensos em massa, com vazão de 1200 kg/h, e uma corrente de água de lavagem contendo 3 % de sólidos, com vazão de 300 kg/h. Essas duas correntes são misturadas antes de passarem pelo sistema de filtração, do qual se obtém uma corrente líquida descartável contendo apenas 0,5 % de sólidos e uma torta de filtro úmida com 55 % de sólidos. Suponha que o sistema está em regime estacionário. Determine as vazões mássicas das duas correntes de saída: a corrente líquida e a torta úmida. Resp.: 946,789 kg/h, 553,211 kg/h

EX19 Uma planta de dessalinização por osmose reversa alimenta 1500 kg/h de água salobra, com concentração de 2,5 % em massa de sais dissolvidos, a uma unidade de separação. Após o processo, obtêm-se duas correntes: uma corrente permeada (água tratada) com concentração de apenas 0,1 % de sais e uma corrente de rejeito concentrado. Se a vazão da água tratada é de 1200 kg/h e o sistema está em estado estacionário, determine a concentração mássica de sais na corrente de rejeito e a vazão dessa corrente. Assuma que não há reações ou perdas. Resp.: 12,1 %, 300 kg/h

EX20 Uma solução efluente de um processo de nitratação tem teor de 21,5 % de ácido nítrico e 35,4 % de ácido sulfúrico. Esta solução deverá ser concentrada pela adição

de soluções de ácido nítrico a 90 % e ácido sulfúrico a 95 % para obter 30% de ácido nítrico e 60 % de ácido sulfúrico. Para se obter 1 ton de solução concentrada, calcule:

a) A massa de solução original. Resp.: 90,3 kg

b) As massas das soluções ácidas concentradas. Resp.: 597,92 kg solução H_2SO_4 e 311,76 kg solução HNO_3

EX21 300 L/min de uma solução A, contendo 75 % (em massa) de etanol e restante água e densidade de 877 kg/m^3 são misturados a uma solução B, contendo 40 % (em massa) de etanol e densidade de 952 kg/m^3 . Essas soluções são misturadas com o objetivo de se obter a solução C, que segundo especificações do cliente, deve apresentar 60 % (em massa) de etanol. O regime permanente é atingido. Determine a vazão volumétrica da solução B que deve ser adicionado ao misturador para atingir a especificação do cliente. Resp.: 207,274 L/min

EX22 Duas soluções aquosas de ácido sulfúrico, uma contendo 20 % (em massa) de ácido e de densidade 1.139 g/L , e a outra contendo 60 % (em massa) de ácido e de densidade 1.498 kg/m^3 , são misturadas para produzir uma solução de concentração 4 mol/L , de densidade $1,213 \text{ g/mL}$. Admita operação em regime permanente.

a) Calcule a fração mássica de ácido sulfúrico na solução que deve ser produzida. Resp.: 32,3 %

b) Considerando uma alimentação de 100 kg/h da solução aquosa de ácido sulfúrico que contém 20 % (em massa) de ácido, determine a vazão volumétrica de alimentação da outra solução. Resp.: 29,712 L/h

EX23 100 kg/h de determinado sólido com teor em massa de 20 % de água necessita ser secado para produzir um sólido que contenha no máximo 4 % de água. Calcule a fração de água removida do sólido original. Resp.: 0,835

Resolução

Primeiramente, se na corrente de entrada existem 20 % água, 80 % representam o sólido. Na saída, se 4 % representam água, 96 % representam o sólido

Aplicando o balanço de massa total, temos que

$$\dot{m}_{\text{úmida}} = \dot{m}_{\text{evap}} + \dot{m}_{\text{seca}}$$

$$100 = \dot{m}_{\text{evap}} + \dot{m}_{\text{seca}}$$

Não é possível resolver, já que existem duas incógnitas. Assim, como alternativa, recorre-se ao balanço de massa parcial para o sólido

$$\begin{aligned}\dot{m}_{\text{sólido úmida}} &= \dot{m}_{\text{sólido evap}} + \dot{m}_{\text{sólido seca}} \\ w_{\text{sólido úmida}} \cdot \dot{m}_{\text{úmida}} &= w_{\text{sólido evap}} \cdot \dot{m}_{\text{evap}} + w_{\text{sólido seca}} \cdot \dot{m}_{\text{seca}} \\ 0,8 \cdot 100 &= 0 \cdot \dot{m}_{\text{evap}} + 0,96 \cdot \dot{m}_{\text{seca}} \\ 80 &= 0,96 \cdot \dot{m}_{\text{seca}} \\ \dot{m}_{\text{seca}} &= \frac{80}{0,96} \\ \dot{m}_{\text{seca}} &\cong 83,333 \text{ kg/h}\end{aligned}$$

Salienta-se que $w_{\text{sólido evap}} = 0$, pois na corrente de água evaporada não existem sólidos, e o balanço de massa escrito foi para analisar somente o sólido. Agora com o valor de $\dot{m}_{\text{seca}}$ retorna a equação de balanço de massa total

$$\begin{aligned}100 &= \dot{m}_{\text{evap}} + \dot{m}_{\text{seca}} \\ 100 &= \dot{m}_{\text{evap}} + 83,333 \\ \dot{m}_{\text{evap}} &= 100 - 83,333 \\ \dot{m}_{\text{evap}} &\cong 16,667 \text{ kg/h}\end{aligned}$$

Por fim, calculando a fração de água removida, temos que partir de um princípio genérico

$$\% \text{remoção}_{\text{água}} = \frac{\text{"para onde a água foi"}}{\text{"de onde a água veio"}} \cdot 100$$

A água foi para a corrente evaporada, representada por $\dot{m}_{\text{evap}}$. A água veio da alimentação, representada por $\dot{m}_{\text{água úmida}}$, que pode ser substituída por $w_{\text{água úmida}} \cdot \dot{m}_{\text{úmida}}$. Assim, temos que

$$\begin{aligned}\% \text{remoção}_{\text{água}} &= \frac{\dot{m}_{\text{evap}}}{w_{\text{água úmida}} \cdot \dot{m}_{\text{úmida}}} \cdot 100 \\ \% \text{remoção}_{\text{água}} &= \frac{16,667}{0,2 \cdot 100} \cdot 100 \\ \% \text{remoção}_{\text{água}} &= \frac{16,667}{20} \cdot 100 \\ \% \text{remoção}_{\text{água}} &= 0,833 \cdot 100 \\ \% \text{remoção}_{\text{água}} &\cong 83,3 \%\end{aligned}$$

Salienta-se que, essa ideia genérica da razão entre “para onde foi” e “de onde veio”, atribuída para o cálculo da $\%remoção_{\text{água}}$, também pode ser aplicada para cálculo da $\%remoção$ de qualquer outra substância. Ela também é válida e pode ser aplicada no cálculo de $\%desvio$ e $\%recuperação$

EX24 Uma corrente de alimentação com 1800 kg/h de solução aquosa contém 6 % de um sal orgânico solúvel. Esse sal é recuperado parcialmente em uma unidade de separação física, resultando em duas saídas: uma corrente concentrada com 24 % de sal, e uma corrente de rejeito com 1% do mesmo sal. Sabendo que 85 % da massa de sal presente na alimentação é efetivamente recuperada na corrente concentrada, determine a vazão mássica da corrente concentrada e da corrente de rejeito. Resp.: 382,5 kg/h, 1417,5 kg/h

EX25 Uma planta de separação de pigmentos recebe uma corrente contendo 1200 kg/h de suspensão aquosa, com 9 % de pigmento em massa. O processo gera duas saídas: uma fase líquida descartável com 1 % de pigmento e uma fase sólida com 40 % de pigmento. A porcentagem de recuperação de pigmento na fase sólida foi de 90 %. Com base nessas informações, determine a vazão mássica da fase sólida gerada no processo. Resp.: 243 kg/h

EX26 Em um processo físico de separação sólido-líquido, deseja-se determinar a eficiência do sistema. Uma corrente de entrada contendo 2000 kg/h de polpa mineral apresenta teor de 15 % de minério de interesse. Ao fim do processo, obtém-se uma corrente de concentrado com 600 kg/h e 50 % de teor do minério. O restante da alimentação sai como rejeito. Com base nesses dados, calcule

- a) a porcentagem de recuperação do minério no concentrado. Resp.: 100 %
- b) a composição de minério no rejeito. Resp.: 0 %

EX27 Um efluente industrial contendo 2 % de um corante é tratado por um processo físico de adsorção. A corrente de alimentação apresenta vazão de 1500 kg/h. Após o processo, são obtidas duas correntes: uma rica em corante, com concentração de 18 %, e uma corrente tratada com apenas 0,2 % de corante. Determine a porcentagem de recuperação do corante na corrente rica e a vazão mássica da corrente rica. Resp.: 91 %, 151,685 kg/h

EX28 Em uma planta de tratamento de efluentes industriais, uma corrente de alimentação com vazão de 2800 kg/h contém 3 % de um metal pesado em solução. O sistema realiza uma extração física, separando o metal em uma corrente rica, com 22 % do metal em massa. A corrente residual apresenta apenas 0,4 % do metal. No entanto, por falha de sensores, desconhece-se a vazão de ambas as correntes de saída. Determine

a) as vazões mássicas das correntes rica e residual. Resp.: 337,037 kg/h, 2462,963 kg/h

b) a porcentagem de recuperação do metal, na corrente rica. Resp.: 88,3 %

EX29 Um processo de clarificação de uma suspensão de partículas de titânio em água é conduzido continuamente com uma corrente de alimentação de 1800 kg/h, contendo 7% de titânio em massa. A separação resulta em uma corrente clarificada com apenas 0,5 % de titânio e uma lama concentrada com 35 % de titânio. A porcentagem de recuperação de titânio na lama é desconhecida. Determine a recuperação percentual de titânio no processo e as vazões das duas correntes de saída. Resp.: 94,2 %, 339,130 kg/h, 1460,870 kg/h

EX30 Uma fábrica de alimentos realiza a separação de proteínas de origem vegetal utilizando um processo de filtração tangencial. Uma corrente de alimentação de 1500 kg/h contém 25 % de proteínas. O processo gera duas correntes: uma permeada, com apenas 5 % de proteína, e uma concentrada. A porcentagem de recuperação da proteína foi de 92 %. Determine a vazão mássica e a composição da corrente concentrada. Resp.: 900 kg/h, 38,3 %

EX31 Uma mistura líquida de vazão 100 mol/h contendo 30% molar de benzeno, 25% molar de tolueno e xileno alimenta uma coluna de destilação. O produto de fundo contém 98% molar de xileno e nenhum benzeno, e 96% do xileno na alimentação são recuperados nessa corrente. O produto de topo alimenta uma segunda coluna. O produto de topo da segunda coluna contém 97% do benzeno contido na alimentação desta coluna. A composição desta corrente é 94% molar de benzeno e o restante tolueno. Determine:

a) A porcentagem de benzeno na alimentação do processo que sai no produto de topo da segunda coluna. Resp.: 97%

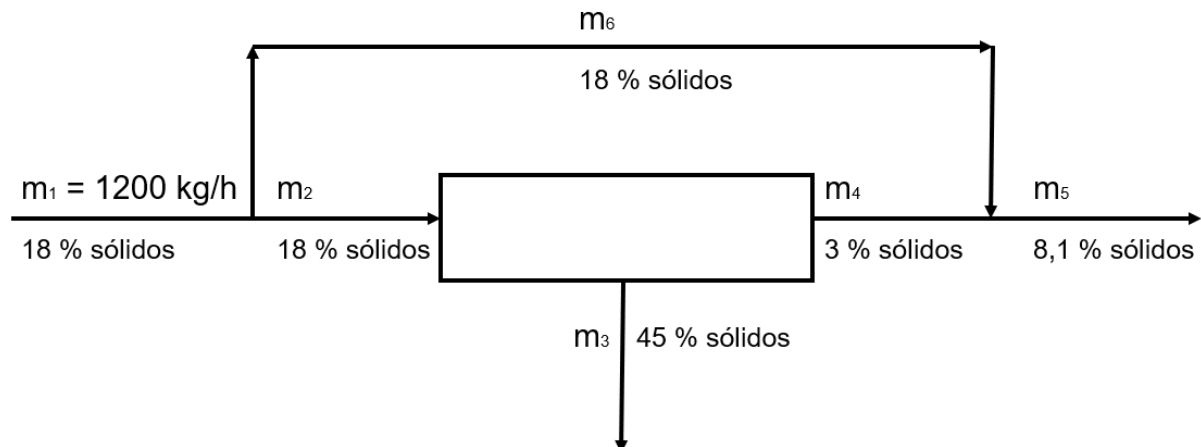
b) A porcentagem do tolueno na alimentação do processo que sai no produto de fundo da segunda coluna. Resp.: 89%

Balço de massa com by-pass

EX32 Em uma planta de clarificação de caldo de cana, parte da corrente de entrada é desviada por by-pass para misturar-se diretamente à corrente final clarificada. A alimentação total tem vazão de 1200 kg/h e teor de sólidos dissolvidos de 18 %. O sistema de clarificação reduz esse teor para 3 % na corrente tratada, que recebe também o fluxo de by-pass. Do sistema de clarificação também sai uma outra corrente, a de lodo, contendo 45 % de sólidos. A corrente final, após mistura da corrente clarificada com a desviada por by-pass, apresenta 8,1 % de sólidos dissolvidos. Sabendo que a operação é estacionária e não há perdas, pede-se:

a) o diagrama de blocos

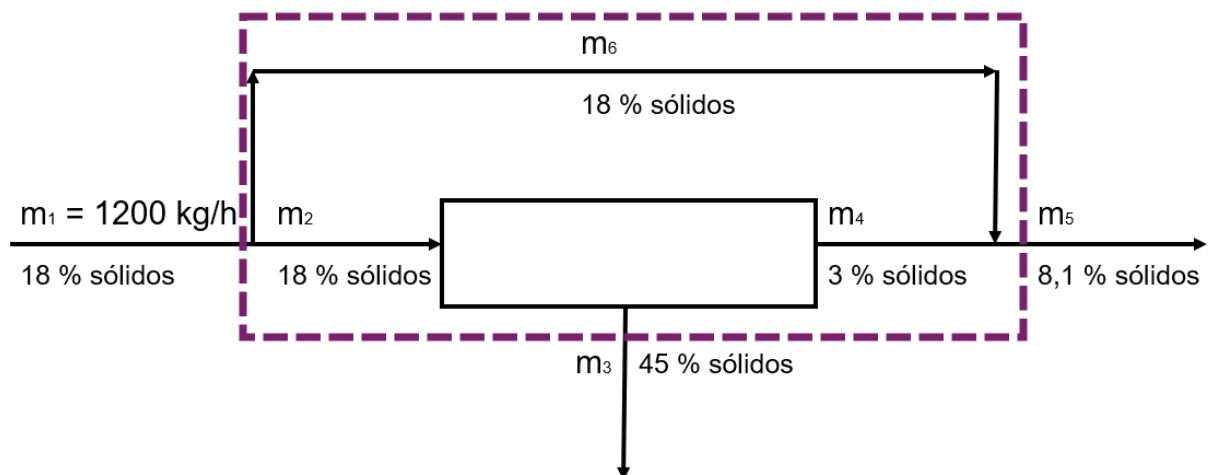
Resolução



b) a vazão da corrente de lodo

Resolução

Primeiramente, um volume de controle deve ser adotado. No caso, o volume escolhido é destacado no diagrama, através do tracejado



Aplicando o balanço de massa total nesse volume de controle, temos que:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_3 + \dot{m}_5$$

$$1200 = \dot{m}_3 + \dot{m}_5$$

$$\dot{m}_5 = 1200 - \dot{m}_3$$

Aplicando o balanço de massa parcial para os sólidos, nesse mesmo volume de controle, temos que:

$$\dot{m}_{\text{sólidos}_1} = \dot{m}_{\text{sólidos}_3} + \dot{m}_{\text{sólidos}_5}$$

$$w_{\text{sólidos}_1} \cdot \dot{m}_1 = w_{\text{sólidos}_3} \cdot \dot{m}_3 + w_{\text{sólidos}_5} \cdot \dot{m}_5$$

$$0,18 \cdot 1200 = 0,45 \cdot \dot{m}_3 + 0,081 \cdot \dot{m}_5$$

$$216 = 0,45 \cdot \dot{m}_3 + 0,081 \cdot \dot{m}_5$$

Substituindo a equação do balanço de massa total, nessa equação de balanço de massa parcial, temos que:

$$216 = 0,45 \cdot \dot{m}_3 + 0,081 \cdot \dot{m}_5$$

$$216 = 0,45 \cdot \dot{m}_3 + 0,081 \cdot (1200 - \dot{m}_3)$$

$$216 = 0,45 \cdot \dot{m}_3 + 97,2 - 0,081 \cdot \dot{m}_3$$

$$0,369 \cdot \dot{m}_3 = 118,8$$

$$0,369 \cdot \dot{m}_3 = \frac{118,8}{0,369}$$

$$\dot{m}_3 \cong 321,951 \text{ kg/h}$$

c) a vazão da corrente de saída do processo

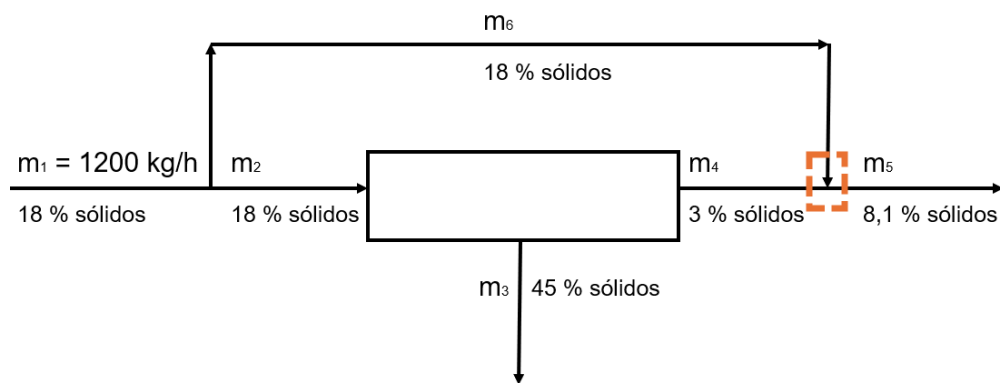
Retornando ao balanço de massa total do item anterior, temos que

$$\begin{aligned}\dot{m}_5 &= 1200 - \dot{m}_3 \\ \dot{m}_5 &= 1200 - 321,951 \\ \dot{m}_5 &\cong 878,049 \text{ kg/h}\end{aligned}$$

d) a fração de alimentação desviada por by-pass

Para esse cálculo, um novo volume de controle deverá ser escolhido, uma vez que a fração desviada por by-pass, será calculada como:

$$\%desvio = \frac{m_6}{m_1} \cdot 100$$



Aplicando o balanço de massa total nesse volume de controle, temos que:

$$\begin{aligned}\dot{m}_4 + \dot{m}_6 &= \dot{m}_5 \\ \dot{m}_4 + \dot{m}_6 &= 878,049 \\ \dot{m}_4 &= 878,049 - \dot{m}_6\end{aligned}$$

Aplicando o balanço de massa parcial para os sólidos, nesse mesmo volume de controle, temos que:

$$\begin{aligned}\dot{m}_{sólidos4} + \dot{m}_{sólidos6} &= \dot{m}_{sólidos5} \\ w_{sólidos4} \cdot \dot{m}_4 + w_{sólidos6} \cdot \dot{m}_6 &= w_{sólidos5} \cdot \dot{m}_5 \\ 0,03 \cdot (878,049 - \dot{m}_6) + 0,18 \cdot \dot{m}_6 &= 0,081 \cdot 878,049 \\ 26,341 - 0,03 \cdot \dot{m}_6 + 0,18 \cdot \dot{m}_6 &= 71,122 \\ 0,15 \cdot \dot{m}_6 &= 44,780 \\ \dot{m}_6 &= \frac{44,780}{0,15} \\ \dot{m}_6 &\cong 298,537 \text{ kg/h}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\%desvio &= \frac{m_6}{m_1} \cdot 100 \\ \%desvio &= \frac{298,537}{1200} \cdot 100 \\ \%desvio &= 0,2489 \cdot 100 \\ \%desvio &\cong 24,9 \%\end{aligned}$$

EX33 Um sistema de filtração de uma emulsão industrial está configurado com by-pass para controlar a concentração do produto final. A corrente de entrada contém 15 % de óleo em água, com vazão total desconhecida. Parte dessa corrente vai para a filtragem (que reduz o teor de óleo para 1 %) e o restante é desviado diretamente para o ponto de mistura final. A corrente final tem vazão de 2000 kg/h e concentração de 6 % de óleo. Sabendo que 60 % da corrente total passou pelo filtro, determine a vazão da corrente de alimentação bruta. Resp.: 1785,714 kg/h

EX34 Na produção de um extrato vegetal, uma corrente de 1000 kg/h contendo 10% de sólidos é parcialmente desviada por by-pass, e o restante é tratado por centrifugação, que gera uma saída com 1 % de sólidos, e uma outra corrente, com os sólidos separados, numa vazão de 150 kg/h. A fração da corrente de alimentação desviada diretamente para o final é de 0,25. Determine a composição (teor de sólidos) da mistura final, obtida após o by-pass. Resp.: 3,6 %

EX35 Em uma operação de pré-tratamento de água, uma corrente de entrada de 1000 kg/h, com concentração desconhecida de sais é parcialmente desviada por by-pass, e o restante passa por um abrandador que reduz a concentração para 0,2 %, a medida que forma um rejeito de 200 kg/h. A fração de by-pass é de 20 %, e a corrente final apresenta 1,2 % de sais. Determine a concentração de sais na corrente de alimentação. Resp.: 4,2 %

EX36 Uma solução contaminada com corante azul entra em uma planta de diluição e purificação, com uma parte da corrente sendo processada e o restante sendo redirecionado por by-pass. A vazão de alimentação é de 1800 kg/h, e a fração desviada por by-pass é de 30 %. A unidade de purificação reduz a concentração de corante de 12 % para 0,5 %, produzindo uma outra saída rica no corante,

apresentando composição de corante de 70 %. Calcule a porcentagem de corante na corrente resultante da mistura entre a saída tratada e a corrente de by-pass. Resp.: 4,4 %

EX37 O suco de laranja integral contém 12% em massa de sólidos, sendo o resto de água, enquanto que o suco de laranja concentrado contém 42% em massa de sólidos. Inicialmente, usava-se um processo de evaporação simples para a concentração, mas os constituintes voláteis do suco escapam com o vapor de água, deixando o concentrado sem gosto. O processo atual resolve o problema desviando uma fração do suco integral do evaporador. O suco que entra no evaporador é concentrado até 58% de sólidos e o produto é depois misturado com o suco integral desviado para atingir a concentração de sólidos desejada. Calcule:

a) A quantidade de produto (suco concentrado de 42%) produzido por cada 100 kg de suco integral que alimentam o processo. Resp.: 28,6 kg

b) A fração de alimentação que é desviada do evaporador. Resp.: 9,5%

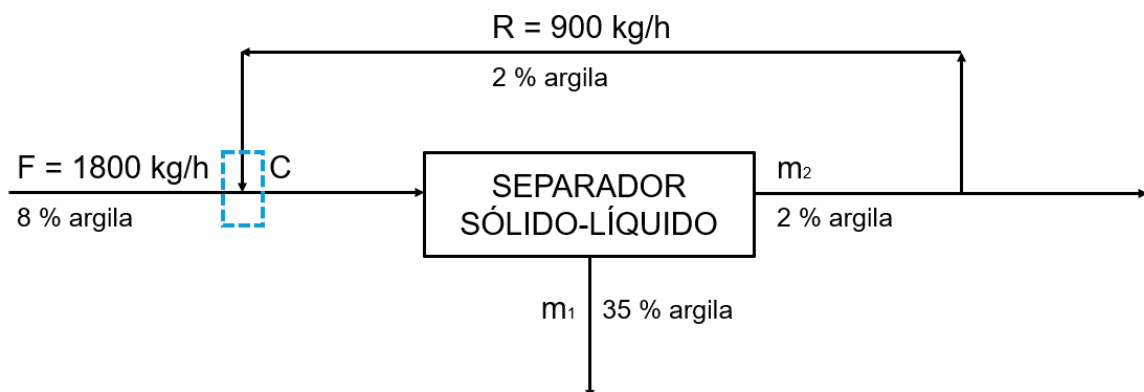
Balanco de massa com reciclo

EX38 Uma corrente contendo 8 % de argila dispersa em água, com vazão de 1800 kg/h, é processada em um equipamento de separação sólido-líquido. A corrente concentrada sai com 35 % de argila, enquanto a corrente líquida (resíduo) tem 2 % de argila. Parte dessa corrente líquida é recirculada na razão de 0,5 kg de reciclo para cada 1 kg de alimentação fresca. Determine

a) a vazão total da mistura de entrada no separador

Resolução

A alimentação fresca é de 1800 kg/h. Sabendo que para cada 1 kg de alimentação fresca, 0,5 kg são utilizados para reciclo, tem-se que o reciclo é igual a 900 kg/h



Aplicando o balanço de massa total no ponto de mistura entre a corrente de alimentação fresca e a corrente de reciclo, para formar a corrente combinada, temos

$$F + R = C$$

$$1800 + 900 = C$$

$$C = 2700 \text{ kg/h}$$

b) A vazão da corrente concentrada.

Resolução

A corrente líquida foi a corrente que sofreu o reciclo, logo a composição de ambas é a mesma. De acordo com o enunciado, é dito que a composição na corrente líquida é de 2 % de argila, assim essa também será a composição de argila no reciclo.

Mantendo o mesmo volume de controle, agora aplicando o balanço de massa parcial para a argila, temos que

$$w_{argila_F} \cdot F + w_{argila_R} \cdot R = w_{argila_C} \cdot C$$

$$0,08 \cdot 1800 + 0,02 \cdot 900 = w_{argila_C} \cdot 2700$$

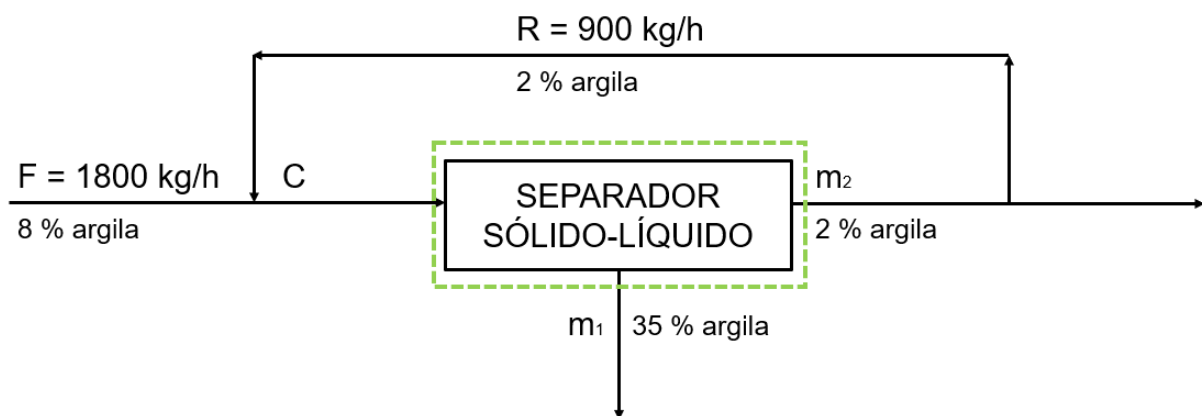
$$144 + 18 = w_{argila_C} \cdot 2700$$

$$162 = w_{argila_C} \cdot 2700$$

$$w_{argila_C} = \frac{2700}{162}$$

$$w_{argila_C} = 6 \%$$

Agora, escolhendo como volume de controle o equipamento de separação sólido-líquido, e aplicando o balanço de massa total, temos



$$C = m_1 + m_2$$

$$2700 = m_1 + m_2$$

$$m_2 = 2700 - m_1$$

Aplicando o balanço de massa parcial para a argila, ainda no mesmo volume de controle, e fazendo a devida substituição pela equação anterior, temos

$$\begin{aligned}
 w_{argila_c} C &= w_{argila_1} \cdot m_1 + w_{argila_2} \cdot m_2 \\
 0,06 \cdot 2700 &= 0,35 \cdot m_1 + 0,02 \cdot m_2 \\
 162 &= 0,35 \cdot m_1 + 0,02 \cdot (2700 - m_1) \\
 162 &= 0,35 \cdot m_1 + 0,02 \cdot 2700 - 0,02 \cdot m_1 \\
 162 &= 0,35 \cdot m_1 + 54 - 0,02 \cdot m_1 \\
 108 &= 0,33 \cdot m_1 \\
 m_1 &= \frac{108}{0,33} \\
 m_1 &\cong 327,293 \text{ kg/h}
 \end{aligned}$$

c) A porcentagem da corrente líquida que é recirculada.

Resolução

Ainda no mesmo volume de controle do item anterior, retornando ao balanço de massa total, pode ser encontrado o valor da corrente de saída do equipamento de separação sólido-líquido

$$\begin{aligned}
 m_2 &= 2700 - m_1 \\
 m_2 &= 2700 - 327,293 \\
 m_2 &\cong 2372,723 \text{ kg/h}
 \end{aligned}$$

Lembrando do conceito genérico apresentado nesse capítulo a cerca de %desvio, %remoção e %recuperação, sendo a razão entre “para onde foi” e “de onde veio”, a %reciclo não é diferente. Logo, temos que

$$\begin{aligned}
 \%reciclo &= \frac{R}{m_2} \cdot 100 \\
 \%reciclo &= \frac{900}{2372,723} \cdot 100 \\
 \%reciclo &= 37,9 \%
 \end{aligned}$$

EX39 No processamento de polpas minerais, uma corrente de alimentação de 2000 kg/h com 12 % de sólidos passa por uma etapa de concentração física. A corrente concentrada, contendo 40 % de sólidos, é enviada para adensamento. Já a corrente diluída (clarificada), com apenas 1% de sólidos, tem 60 % de sua vazão

recirculada para se misturar à alimentação fresca, enquanto o restante é descartado. Calcule:

- a) a vazão da corrente de reciclo. Resp.: 2153,846 kg/h
- b) a composição da corrente que entra na etapa de concentração. Resp.: 6,3 %, 93,7 %

EX40 Um sistema de filtração contínua é utilizado para concentrar uma polpa mineral. O concentrado contém 45% de sólidos, enquanto a corrente clarificada contém 3% de sólidos. O processo recebe uma alimentação combinada, cuja composição é 20% de sólidos. Sabe-se que a corrente clarificada efluente do filtro é de 2500 kg/h, que 40 % desta é descartada, enquanto o restante é reciclado para se combinar com a alimentação fresca. Pede-se:

- a) A vazão do reciclo. Resp.: 1500 kg/h
- b) A vazão de alimentação fresca. Resp.: 2700 kg/h

EX41 Na produção de um extrato vegetal, uma suspensão aquosa contendo 5 % de extrato é usada como matéria-prima. A corrente líquida sai com 3 % de extrato, enquanto os sólidos saem com 65 %. Para aumentar a eficiência do sistema, uma parte da corrente líquida é recirculada e se mistura com uma alimentação fresca de 850 kg/h. Sabendo que a razão entre a corrente de reciclo e a alimentação fresca é de 1,5, determine a porcentagem de reciclo. Resp.: 60,8 %

EX42 Em uma unidade de preparação de polpa cerâmica para moldagem por extrusão, uma suspensão de óxidos metálicos em água é concentrada por um sistema de ultrafiltração contínua. Na entrada do equipamento, a corrente apresenta 25 % sólidos. O concentrado obtido na saída do sistema apresenta uma vazão de 375 kg/h, com 50 % de sólidos, enquanto a corrente clarificada apresenta 3% de sólidos. Essa é parcialmente reciclada para manter a estabilidade da alimentação, de modo que o descarte tem uma vazão de 325,98 kg/h. Considerando operação em regime permanente, determine a razão entre a vazão de reciclo e a vazão de alimentação fresca. Resp.: 0,8

EX43 Uma planta industrial opera com um sistema de reciclo para concentrar partículas de uma suspensão. A corrente de entrada do concentrador contém 13 % de

sólidos e é obtida pela mistura entre uma corrente fresca, de 6 % de sólidos, com uma corrente recirculada. A vazão da carga combinada que entra no separador físico é de 2500 kg/h. A corrente concentrada sai com 28 % de sólidos, e a outra corrente sai com 2 %, sendo 80 % recirculada. Determine a vazão da corrente fresca de alimentação e da corrente concentrada. Resp.: 1653,846 kg/h, 1442,308 kg/h

EX44 Em uma planta de recuperação de pigmentos naturais, uma suspensão contendo pigmentos vegetais é concentrada em um decantador, do qual se obtém uma fase líquida, de vazão 1230 kg/h, e uma fase espessa. Parte da fase líquida é recirculada ao sistema, garantindo na entrada no decantador um teor de 3,5 % de pigmentos. A alimentação ao decantador é feita a partir da mistura entre uma corrente fresca de 900 kg/h com 6 % de pigmentos e a fração recirculada. Sabendo que a porcentagem de reciclo é de 60 %, determine a porcentagem de pigmentos:

a) na corrente recirculada. Resp.: 2,3 %

b) na corrente espessa. Resp.: 28,7 %

CAPÍTULO 5 – CONCEITOS BÁSICOS DE ESTEQUIOMETRIA

A estequiometria é um dos pilares fundamentais da química, representando o estudo quantitativo das substâncias envolvidas em uma reação química.

Trata-se de um campo que não apenas descreve as proporções ideais em uma reação, mas também permite prever resultados experimentais, planejar sínteses e controlar processos industriais com rigor científico.

Reagente limitante e reagente em excesso

O reagente limitante é definido como aquele reagente que, estando presente em quantidade estequiometricamente insuficiente em relação aos demais reagentes envolvidos na reação, determina o limite máximo da conversão da reação.

Em outras palavras, é o reagente que se esgota primeiro durante o curso da reação, impedindo que os demais continuem a reagir, mesmo que ainda estejam presentes em excesso.

A sua identificação é feita por meio da comparação entre as quantidades reais fornecidas dos reagentes e suas proporções estequiométricas na reação balanceada. Matematicamente, a razão molar entre a quantidade disponível de cada reagente e seu respectivo coeficiente estequiométrico é calculada, e o menor valor obtido indica o reagente limitante.

Por outro lado, o reagente em excesso é aquele presente em quantidade superior à exigida pela proporção estequiométrica em relação ao reagente limitante. Sua função, muitas vezes deliberadamente explorada, é aumentar a taxa de reação, deslocar o equilíbrio em favor da formação de produtos ou garantir conversões mais elevadas do reagente mais valioso ou menos disponível.

A porcentagem de excesso ou excesso percentual é uma medida relativa que quantifica quanto a mais foi fornecido de um determinado reagente em comparação ao necessário para reagir completamente com o reagente limitante. Essa grandeza é expressa pela fórmula:

$$\%excesso = \frac{n_{alimentado} - n_{teórico}}{n_{teórico}} \cdot 100$$

onde $n_{alimentado}$ é a quantidade de matéria que de fato foi alimentada ao processo e $n_{teórico}$ é a quantidade de matéria que a reação exige, mantendo a devida proporção com o reagente limitante

Conversão, rendimento e seletividade

O conceito de conversão está diretamente relacionado ao grau de aproveitamento do reagente limitante na formação dos produtos da reação. Ela representa a fração ou porcentagem da quantidade inicial do reagente limitante que é efetivamente transformada em produtos. Sua expressão matemática é dada por:

$$X = \frac{n_{RL\text{consumido}}}{n_{RL\text{alimentado}}} \cdot 100$$

onde $n_{RL\text{consumido}}$ é a quantidade de matéria de reagente limitante que foi consumido no reator, e $n_{RL\text{alimentado}}$ é a quantidade de matéria de reagente limitante que foi alimentado no reator.

O rendimento está vinculado à quantidade de produto obtido em relação à quantidade teoricamente possível, considerando-se o reagente limitante como base de cálculo. A fórmula geral para o rendimento é:

$$RF = \frac{n_{\text{produto obtido}}}{n_{\text{produto teórico}}} \cdot 100$$

onde $n_{\text{produto obtido}}$ é a quantidade de matéria de produto realmente obtido na saída do processo, e $n_{\text{produto teórico}}$ é a quantidade de matéria de produto que teria sido obtido caso não ocorressem reações paralelas e/ou todo o reagente limitante tivesse sido consumido.

A seletividade é um conceito especialmente relevante em reações múltiplas ou complexas, onde mais de um produto pode ser formado. Refere-se à preferência da reação pela formação de um determinado produto em detrimento de outros. A seletividade pode ser expressa em relação à quantidade de reagente consumido ou em relação aos produtos formados. No primeiro caso, a seletividade em relação ao reagente consumido é dada por:

$$S = \frac{n_{\text{produto desejado obtido}}}{n_{\text{produto indesejado obtido}}} \cdot 100$$

onde $n_{\text{produto desejado obtido}}$ é a quantidade de matéria de produto desejado realmente obtido na saída do processo, e $n_{\text{produto indesejado obtido}}$ é a quantidade de matéria de produto(s) indesejado(s) realmente obtido(s) na saída do processo

CAPÍTULO 6 - BALANÇO DE MASSA EM SISTEMAS QUÍMICOS

Diferentemente dos sistemas físicos, onde as espécies químicas permanecem inalteradas em suas identidades e quantidades, os sistemas químicos envolvem transformações de substâncias através de reações químicas. Essas transformações geram produtos a partir de reagentes, e implicam mudanças nas composições das correntes que atravessam o processo.

A base para realizar balanços de massa em sistemas com reação é, ainda, o princípio da conservação da massa. No entanto, a aplicação dessa conservação deve ser feita considerando que massas de espécies químicas específicas podem ser consumidas ou geradas pela reação, ainda que a massa total do sistema seja invariável. Ou seja, mesmo que um componente desapareça ao longo do processo por ser transformado quimicamente, sua massa se conserva, pois os átomos que o compõem continuam existindo, reagrupados em outras moléculas.

Nos balanços em sistemas com reação, o uso de equações estequiométricas balanceadas é fundamental. A estequiometria define as proporções moleculares ou mássicas com que os reagentes participam da reação e com que os produtos são formados. Isso permite estabelecer relações quantitativas entre as diferentes espécies envolvidas. Com base nessas relações, é possível escrever equações de balanço para cada componente.

Outros elementos críticos na análise de balanço de massa com reação química são a eventual presença de um reagente em excesso, a conversão de reagentes, o rendimento da reação e a seletividade.

Para a correta formulação de um balanço de massa em sistema químico, é essencial identificar corretamente as seguintes informações:

- 1) a equação balanceada da reação ou reações envolvidas
- 2) a composição e vazão das correntes de entrada e saída
- 3) as condições de operação (pressão, temperatura, regime de fluxo)
- 4) as variáveis de reação, como conversão, rendimento e seletividade
- 5) o volume de controle apropriado.

O modelo genérico do balanço de massa para um componente A, sujeito a transformação química, pode ser expresso como:

$$\text{Entrada de A} - \text{Saída de A} + \text{Geração de A} - \text{Consumo de A} = \text{Acúmulo de A}$$

Em sistemas estacionários, o termo de acúmulo é nulo. A geração e o consumo devem ser calculados com base na estequiometria e na taxa de reação, ou a partir de dados de conversão global, caso não haja detalhamento cinético disponível.

A modelagem de balanço de massa em sistemas químicos também exige atenção especial à definição do sistema e à escolha de um volume de controle adequado. Em algumas situações, convém realizar o balanço apenas na zona de reação, enquanto em outras pode-se considerar também as correntes de reciclo e purga, que afetam a composição da alimentação ao reator. Esse tipo de análise é particularmente útil para o dimensionamento de processos, a escolha de condições operacionais e a avaliação de alternativas de processo.

Cabe destacar que, mesmo em processos químicos, podem existir correntes que não participam da reação, como solventes inertes, catalisadores heterogêneos ou componentes transportados passivamente. Nesses casos, tais componentes devem ser tratados como inertes no balanço de massa, ou seja, entram e saem com a mesma vazão.

Os sistemas com reação também estão frequentemente associados a processos de reciclo e *by-pass*, sobretudo quando há interesse econômico em recuperar reagentes não convertidos, ou em controlar a composição de entrada em um reator. Nessas configurações, o balanço de massa deve considerar as ramificações das correntes e seus efeitos sobre a conversão e a eficiência do processo.

Balanço total e parcial num sistema químico

A distinção entre balanço de massa total e balanço de massa parcial é de particular importância quando se trabalha com sistemas químicos. Em um sistema químico, o balanço total não oferece informações específicas sobre como as espécies reagiram ou em que proporções.

Por outro lado, o balanço de massa parcial é aplicado a componentes específicos ou a grupos de componentes dentro do sistema, permitindo análises muito mais detalhadas e precisas das transformações envolvidas.

Em um sistema com reação, esse tipo de balanço é essencial, pois as massas individuais de cada substância não são conservadas: reagentes são consumidos e produtos são formados. Assim, o balanço parcial leva em conta a geração ou consumo de cada espécie química, conforme ditado pela estequiometria da reação.

A aplicação de um balanço parcial requer conhecimento prévio da equação química balanceada, bem como da conversão do reagente principal ou da fração de produtos formados. O balanço é escrito para cada componente

Tipos de balanço parcial num sistema químico

Nos sistemas químicos, a complexidade introduzida pelas transformações moleculares impõe ao engenheiro a necessidade de utilizar diferentes abordagens de balanço de massa, conforme a natureza do problema, os dados disponíveis e os objetivos da análise.

Embora todos os tipos de balanço partam do mesmo princípio fundamental, existem diferentes maneiras de estruturar matematicamente essa conservação para lidar com reações químicas. Entre as formas mais usuais e úteis estão o balanço por espécie, o balanço por elementos (ou átomos) e o balanço por extensão de reação.

Balanço parcial por espécie

O balanço por espécie química, também conhecido como balanço parcial por componente, é o mais comum e direto. Ele consiste em aplicar a conservação da massa individualmente para cada substância química que participa do processo, independente se é reagente, produto, intermediário ou inerte. Para cada componente i , a equação geral em estado estacionário se expressa como:

$$\dot{m}_{i_{ent}} - \dot{m}_{i_{sai}} + \dot{m}_{i_{ger}} - \dot{m}_{i_{cons}} = 0$$

ou

$$\dot{n}_{i_{ent}} - \dot{n}_{i_{sai}} + \dot{n}_{i_{ger}} - \dot{n}_{i_{cons}} = 0$$

onde $\dot{m}_i$ é a vazão mássica e $\dot{n}_i$ é a vazão molar

Um ponto importante é que o balanço por espécie não conserva massa individualmente em sistemas com reação, já que tanto o número de mols quanto a massa de uma substância podem mudar pela reação. Assim, embora a massa total seja conservada, a massa de uma dada espécie pode aumentar ou diminuir ao longo do processo.

Balanço parcial por átomos

Em situações onde há reação química e consequente transformação das espécies moleculares, o balanço por espécies pode ocultar a verdadeira conservação que ocorre: a dos átomos. Os elementos químicos não são criados nem destruídos em reações químicas convencionais. Apenas se reorganizam para formar novas moléculas.

O balanço por elementos ou balanço atômico consiste, portanto, em aplicar a conservação da massa sobre os átomos constituintes das espécies, independentemente de sua forma molecular.

Essa abordagem é especialmente útil em sistemas complexos com múltiplas reações, quando há incerteza nas reações envolvidas, ou quando se deseja apenas verificar se as transformações estão de fato obedecendo à conservação da matéria.

Balanço parcial por extensão de reação

O balanço por extensão de reação é uma abordagem mais abstrata, porém extremamente poderosa, sobretudo quando se busca descrever matematicamente o avanço das reações.

A extensão de reação, representada pela letra grega ξ , mede o quanto a reação ocorreu. A variação na quantidade molar de cada componente está diretamente relacionada ao avanço da reação e aos coeficientes estequiométricos:

$$\dot{n}_{i\text{sai}} = \dot{n}_{i\text{ent}} \pm \nu_i \cdot \xi$$

onde $\dot{n}_{i\text{sai}}$ é a quantidade de mols de um dado componente i na saída do reator, $\dot{n}_{i\text{ent}}$ é a quantidade de mols de um dado componente i na entrada do reator, ν_i é o coeficiente estequiométrico de um dado componente i e ξ é a extensão de reação.

Essa abordagem tem diversas vantagens:

- Permite modelar o comportamento do sistema com base na quantidade de reação ocorrida, mesmo sem conhecer todas as vazões diretamente.
- É altamente útil na formulação de balanços diferenciais para reações em batelada ou reatores com regime transiente.
- Em sistemas com múltiplas reações independentes, podem-se definir várias extensões de reação simultâneas cada uma associada a uma equação

estequiométrica, resultando em um sistema de equações que descreve toda a cinética do processo.

Sistemas químicos com reciclo

Em reações químicas que não atingem conversão completa, uma fração significativa dos reagentes permanece não reagida na corrente de saída do reator. Eliminar esses reagentes por descarte seria economicamente indesejável e ambientalmente inadequado. Assim, opta-se por separar os produtos da mistura de saída (usando destilação, extração, absorção, entre outros), e reciclar os reagentes não convertidos de volta ao reator.

Um exemplo clássico é a síntese de amônia a partir de nitrogênio e hidrogênio. A conversão por passagem, mesmo em condições severas, raramente ultrapassa 20%. Por isso, após o reator, a corrente é separada: a amônia formada é retirada, e os gases não reagidos são comprimidos e redirecionados à entrada. O resultado é um aumento na conversão global, mesmo mantendo a conversão por passagem constante.

Do ponto de vista do balanço de massa, a introdução do reciclo modifica a estrutura do sistema, pois há agora correntes internas que se somam às correntes de alimentação fresca. A composição da mistura de entrada ao reator passa a depender da corrente de reciclo, o que exige cuidados adicionais na formulação dos balanços, sobretudo ao se calcular conversões, rendimentos e seletividades.

Sistemas químicos com purga

No entanto, o uso de reciclo indiscriminado pode levar a problemas operacionais se houver a acumulação progressiva de componentes inertes ou indesejados no circuito fechado. Isso ocorre, por exemplo, quando a alimentação contém pequenas quantidades de contaminantes (ou inertes) que não reagem e não são removidos nos sistemas de separação, sendo, portanto, continuamente reciclados. Com o tempo, esses componentes se acumulam a ponto de diluir os reagentes ativos, comprometendo a conversão, ou mesmo afetar a segurança do sistema.

Para evitar essa situação, é introduzida uma corrente de purga, que consiste na remoção controlada de parte da corrente reciclada, de forma a manter o acúmulo

de inertes ou impurezas sob controle. A purga representa, portanto, um compromisso entre eficiência e controle da composição do sistema.



PURGA NÃO É SEPARAÇÃO!!!!

A definição da fração de purga ideal envolve um equilíbrio técnico-econômico. Se a purga for muito pequena, os inertes se acumularão; se for muito grande, aumenta-se o desperdício de matéria-prima. Assim, a razão de purga é frequentemente ajustada com base em modelos matemáticos de balanço de massa e em análises de composição da corrente reciclada.

Matematicamente, a purga introduz novas variáveis nos balanços de massa e nos cálculos de composição. Em sistemas complexos, pode-se ter correntes de reciclo misturadas com a alimentação fresca, onde a composição da entrada ao reator depende de uma mistura ponderada entre a corrente de reciclo e a alimentação nova, descontadas da porção removida na purga. Isso exige atenção especial no fechamento dos balanços parciais e no cálculo de conversão e rendimento.

Denomina-se de princípio da purga, quando há a garantia de que a quantidade de inerte na alimentação fresca, seja igual a quantidade de inerte que sai na purga, evitando assim seu acúmulo. Esse equilíbrio pode ser representado por um balanço de massa estacionário para os inertes, do tipo

$$\dot{m}_{inerte_{ent}} = \dot{m}_{inerte_{purga}}$$

ou

$$\dot{n}_{inerte_{ent}} = \dot{n}_{inerte_{purga}}$$

EXERCÍCIOS

Balço de massa em sistema químico

EX1 Na produção de hidrazina (N_2H_4), ocorre a reação de hipoclorito de sódio com amônia, segundo a equação simplificada: $2 NH_3 + NaOCl \rightarrow N_2H_4 + NaCl + H_2O$. Em um reator, são alimentados 1,2 kmol/h de amônia e 1 kmol/h de hipoclorito de sódio. Ao fim da reação, detectam-se 0,60 kmol/h de hidrazina formada.

a) Determine qual dos reagentes está em excesso e qual é o limitante

Resolução

Uma das maneiras de se determinar quem é o reagente em excesso e quem é o reagente limitante, é através da determinação do quociente reacional

$$r_{NH_3} = \frac{n_{NH_3}}{\text{Coeficiente estequiométrico}_{NH_3}} \quad r_{NaOCl} = \frac{n_{NaOCl}}{\text{Coeficiente estequiométrico}_{NaOCl}}$$
$$r_{NH_3} = \frac{1,2}{2} \quad r_{NaOCl} = \frac{1}{1}$$
$$r_{NH_3} \cong 0,6 \quad r_{NaOCl} \cong 1$$

O reagente limitante é o que apresenta o menor resultado, logo a amônia (NH_3), enquanto que o reagente em excesso é o que apresenta o maior resultado, logo o hipoclorito de sódio ($NaOCl$)

b) Calcule a conversão do reagente limitante

Resolução

Agora sabendo quem é o reagente limitante, toda a estequiometria da reação é baseado nele. Se houve a constatação de que foi formado 0,7 kmol/h de hidrazina, sabendo que a proporção estequiométrica entre amônia e hidrazina é de 2:1, logo o consumo de amônia é de 1,2. Assim, montando a tabela estequiométrica e completando as lacunas, temos que

	2 NH_3	+	1 $NaOCl$	$\rightarrow$	1 N_2H_4	+	1 $NaCl$	+	1 H_2O
	2 kmol		1 kmol		1 kmol		1 kmol		1 kmol
Alimentação	1,2		1		----		----		----
Reação	1,2		0,6		0,6		0,6		0,6
Saída	----		0,4		0,6		0,6		0,6

Para calcular a conversão, sabemos que:

$$X = \frac{n_{RL\text{consumido}}}{n_{RL\text{alimentado}}} \cdot 100$$

$$X = \frac{1,2}{1,2} \cdot 100$$

$$X = 1.100$$

$$X = 100 \%$$

c) Determine a composição molar da corrente de saída, considerando que todos os produtos permanecem na fase líquida e que não há subprodutos.

Resolução

A composição molar da corrente de saída, deverá ser calculada a partir dos dados da linha SAÍDA da tabela estequiométrica. Na saída, a corrente total tem um valor dado pela soma das quantidades individuais de cada componente, logo

$$n_{saída} = 0,4 + 0,6 + 0,6 + 0,6 \cong 2,2 \text{ kmol/h}$$

Portanto, a composição será

$$x_{NaOCl} = \frac{0,4}{2,2} \cdot 100$$

$$x_{N_2H_4} = \frac{0,6}{2,2} \cdot 100$$

$$x_{NaCl} = \frac{0,6}{2,2} \cdot 100$$

$$x_{H_2O} = \frac{0,6}{2,2} \cdot 100$$

$$x_{NaOCl} \cong 18,2 \%$$

$$x_{N_2H_4} \cong 27,3 \%$$

$$x_{NaCl} \cong 27,3 \%$$

$$x_{H_2O} \cong 27,3 \%$$

EX2 Na produção de ácido nítrico, o primeiro estágio consiste na oxidação do amoníaco segundo a reação: $4 \text{ NH}_3 + 5 \text{ O}_2 \rightarrow 4 \text{ NO} + 6 \text{ H}_2\text{O}$. O reator recebe 200 mol/h de amoníaco e 300 mol/h de oxigênio. No entanto, apenas 90 % do amoníaco é consumido. Sabendo disso, determine a quantidade (em mol/h) de óxido nítrico (NO) produzida. Assuma que a reação ocorre de forma estequiométrica com relação ao amoníaco convertido.

Resolução

Pelo fato do enunciado ter informado que a conversão de 90 % é do amoníaco, e do conceito de conversão, essa medida sempre está atrelada ao reagente limitante, logo se conclui que o amoníaco é o reagente limitante. Do cálculo, temos que

$$X = \frac{n_{NH_3\text{consumido}}}{n_{NH_3\text{alimentado}}} \cdot 100$$

$$\begin{aligned}
 X &= \frac{n_{NH_3 \text{ alimentado}} - n_{NH_3 \text{ saída}}}{n_{NH_3 \text{ alimentado}}} \cdot 100 \\
 90 &= \frac{200 - n_{NH_3 \text{ saída}}}{200} \cdot 100 \\
 0,90 &= \frac{200 - n_{NH_3 \text{ saída}}}{200} \\
 0,9 \cdot 200 &= 200 - n_{NH_3 \text{ saída}} \\
 180 &= 200 - n_{NH_3 \text{ saída}} \\
 n_{NH_3 \text{ saída}} &= 200 - 180 \\
 n_{NH_3 \text{ saída}} &= 20 \text{ mol/h}
 \end{aligned}$$

Aplicando o balanço de massa parcial por extensão de reação, para o amoníaco, temos que

$$\begin{aligned}
 n_{NH_3 \text{ saída}} &= n_{NH_3 \text{ entrada}} - \nu_{NH_3} \cdot \xi \\
 20 &= 200 - 4 \cdot \xi \\
 4 \cdot \xi &= 200 - 20 \\
 4 \cdot \xi &= 180 \\
 \xi &= \frac{180}{4} \\
 \xi &= 45 \text{ mol/h}
 \end{aligned}$$

Aplicando o balanço de massa parcial por extensão de reação, para o óxido nítrico, temos que

$$\begin{aligned}
 n_{NO \text{ saída}} &= n_{NO \text{ entrada}} - \nu_{NO} \cdot \xi \\
 n_{NO \text{ saída}} &= 0 + 4 \cdot \xi \\
 n_{NO \text{ saída}} &= 4 \cdot 45 \\
 n_{NO \text{ saída}} &= 180 \text{ mol/h}
 \end{aligned}$$

EX3 Na produção de cloreto de hidrogênio (HCl) por reação direta de gás cloro com hidrogênio, a reação é: $H_2 + Cl_2 \rightarrow 2 HCl$. Uma corrente de alimentação equimolar contendo H_2 e Cl_2 , com vazão total de 600 mol/h, é enviada a um reator com conversão de 75 % do hidrogênio. Sabendo que a reação ocorre segundo estequiometria direta, determine:

a) A vazão molar de cloreto de hidrogênio formado na saída do reator. Resp.: 450 mol/h

b) A composição molar da corrente de saída. Resp.: 12,5 %, 12,5 %, 75%

EX4 Uma reação de formação de metanol é conduzida a partir de gás de síntese, uma mistura de monóxido de carbono e hidrogênio. A equação química é a seguinte: $\text{CO} + 2 \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$. O reator é alimentado com uma corrente que contém 40 % mol de monóxido de carbono e 60% mol de hidrogênio, em um total de 500 mol/h. No estado estacionário, sabe-se que a conversão é de 50 %. Determine a composição molar da corrente de saída do reator. Resp.: 35,7 %, 42,9 %, 21,4 %

EX5 Em uma planta química, deseja-se produzir óxido de etileno a partir da oxidação parcial do etileno com oxigênio gasoso. A reação global que ocorre no reator é: $\text{C}_2\text{H}_4 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_4\text{O}$. A alimentação para o reator é composta por uma mistura de 80 mol/h de etileno e 100 mol/h de oxigênio. Sabe-se que 60% do etileno é convertido na reação. Supondo que não ocorra nenhuma outra reação paralela, determine a vazão molar (em mol/h) de cada componente na corrente de saída do reator. Resp.: 32 mol/h, 76 mol/h, 48 mol/h

EX6 Em um processo de oxidação controlada, o etileno é parcialmente convertido em óxido de etileno, conforme a reação: $\text{C}_2\text{H}_4 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{C}_2\text{H}_4\text{O}$. No entanto, parte do etileno também é oxidado completamente, formando dióxido de carbono e água: $\text{C}_2\text{H}_4 + 3 \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O}$. Uma alimentação composta por 100 mol/h de etileno e 160 mol/h de oxigênio entra no reator. Após a reação, detecta-se a formação de 40 mol/h de óxido de etileno e 20 mol/h de dióxido de carbono. Considerando que as únicas reações são as acima, calcule:

a) A conversão do etileno. Resp.: 50 %

b) O rendimento de óxido de etileno. Resp.: 40 %

b) A composição molar da corrente de saída do reator. Resp.: 20,8 %, 45,8 %, 16,7 %, 8,3 %, 8,3 %

EX7 A síntese do metanol a partir de gás de síntese pode ser descrita pela equação global: $\text{CO} + 2 \text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{OH}$. Foram introduzidos 12 mol de monóxido de carbono e

20 mol de hidrogênio em um reator fechado e isobárico. Após certo tempo, a extensão de reação observada é de 6 mol.

- a) Calcule a composição da mistura reacional no estado final, em mol. Resp.: 30 %, 40 %, 30 %
- b) Determine qual foi a conversão do CO. Resp.: 50 %

EX8 Eteno pode ser produzido pela desidrogenação catalítica de etano onde metano também é gerado como produto indesejado. A carga de processo tem vazão molar de 100 mol/h e é composta por 91,4 % de etano e 8,6 % de inerte. A conversão do etano de é 57,7 % e o rendimento fracional é de 55,5 %. Calcule:

- a) A composição do produto efluente. Resp.: 25,65 % C_2H_6 , 33,65 % C_2H_4 , 32,32 % H_2 , 2,67 % CH_4 e 5,71 % inertes
- b) A seletividade do eteno em relação ao metano. Resp.: 12,612 kmol eteno/kmol metano

EX9 O metano e o oxigênio reagem na presença de um catalisador para formar formaldeído. Em uma reação paralela, parte do metano é oxidado a dióxido de carbono e água. Sabe-se que a corrente de entrada do reator é uma mistura equimolar de metano e oxigênio de vazão molar igual a 100 mol/s, além de que a conversão de metano por passe no reator é de 90 % e o rendimento fracional do formaldeído é de 85,5 %. Calcule:

- a) A composição molar da corrente de saída do reator. Resp.: 5 % CH_4 , 2,75 % O_2 , 42,75 % $HCOH$, 2,25 % CO_2 e 42,75 % H_2O
- b) A seletividade da produção de formaldeído em relação à produção de dióxido de carbono. Resp.: 19 mol $HCOH$ /mol CO_2

EX10 O etanol é produzido comercialmente pela hidratação do etileno, contudo parte do produto é convertido em dietil éter numa reação paralela. A alimentação do reator contém etileno, vapor de água e um gás inerte. Uma amostra de 100 mol do efluente do reator é analisada e apresenta como resultado que nessa corrente há 43,4 % molar de etileno, 2,5 % molar de etanol, 0,14 % molar de éter, 9,3 % molar de inerte e o restante água. Calcule:

- a) A composição molar da alimentação do reator. Resp.: 44,93 % C_2H_6 , 46,02 % H_2O e 9,05 % inertes

- b) A conversão do etileno. Resp.: 6,02 %
 c) O rendimento fracional do etanol. Resp.: 5,4 %
 d) A seletividade do etanol em relação ao éter. Resp.: 17,9 mol etanol/mol dietil éter

EX11 Aldeído fórmico pode ser produzido pela reação de metano e oxigênio na presença de um catalisador, gerando também dióxido de carbono como produto indesejável. Se a composição do produto do reator em porcentagem molar é de 45,4 % de formaldeído, 0,8 % de dióxido de carbono, 3,8 % de metano, 47 % de água e 3 % de oxigênio, calcule:

- a) A conversão do metano. Resp.: 92,4 %
 b) O rendimento fracional do formaldeído. Resp.: 90,8 %
 c) A seletividade do formaldeído em relação ao dióxido de carbono. Resp.: 56,8 mol HCOH/mol CO₂

Balanco de massa em sistema químico com reciclo e/ou purga

EX12 O óxido de propileno é produzido pela oxidação seletiva do propileno: $C_3H_6 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow C_3H_6O$. A alimentação fresca (F) contém 65,3 % de propileno e 32,7 % de oxigênio, com 2 % molar de CO₂ como inerte. A vazão da alimentação é de 120 mol/h. Essa alimentação é misturada a uma corrente reciclada (R) na razão R/F = 2,5. O reator opera com conversão de 12 % por passe. O óxido de propileno é removido integralmente após o reator. A carga combinada, que alimenta o reator, apresenta 62,7 % de propileno e 31,3 % de oxigênio, e não pode ultrapassar 6 % molar de CO₂ na entrada do reator. Determine:

- a) A taxa de purga necessária.

Primeiramente, adota-se como volume de controle, o ponto de mistura da corrente fresca com a corrente de reciclo, e nesse volume se aplica um balanço de massa total

$$\begin{aligned} F + R &= C \\ 120 + (2,5 \cdot 120) &= C \\ C &= 420 \text{ mol/h} \end{aligned}$$

Agora, ainda no mesmo volume de controle, aplica-se um balanço de massa parcial para o inerte

$$x_F \cdot F + x_R \cdot R = x_C \cdot C$$

$$0,02.120 + x_R.300 = 0,06.420$$

$$2,4 + x_R.300 = 25,2$$

$$x_R.300 = 22,8$$

$$x_R = \frac{22,8}{300}$$

$$x_R \cong 7,6 \%$$

Sabe-se que a composição do reciclo, é igual a composição da purga. Mais do que isso, para garantir o acúmulo de inertes, de acordo com o princípio da purga, a quantidade de inertes na carga fresca deve ser igual a quantidade de inertes na purga, logo

$$x_{inerte_F}.F = x_{inerte_P}.P$$

$$x_{inerte_F}.F = x_R.P$$

$$0,02.120 = 0,076.P$$

$$2,4 = 0,076.P$$

$$P = \frac{2,4}{0,076}$$

$$P \cong 31,579 \text{ mol/h}$$

b) A razão purga/reciclo

Resolução

A razão purga/reciclo é expressa por

$$q = \frac{P}{R}$$

$$q = \frac{31,579}{300}$$

$$q \cong 0,105 \text{ mol/mol}$$

c) A produção de propileno óxido.

Resolução

O enunciado não deu nenhum indício direto de quem é o reagente limitante. Logo, a primeira análise a ser feita é identificar os respectivos reagentes. Ao efetuar esse procedimento (como já indicado na resolução do EX1 desse capítulo), chega-se a conclusão de que não há reagente em excesso e reagente limitante, ou seja, a alimentação na carga fresca seguir proporções estequiométricas. Assim, a conversão de 12 % pode ser aplicada sobre qualquer um dos reagentes.

$$X = \frac{n_{C_3H_6 \text{ consumido}}}{n_{C_3H_6 \text{ alimentado}}} \cdot 100$$

$$12 = \frac{n_{C_3H_6 \text{ consumido}}}{0,627.420} \cdot 100$$

$$0,12 = \frac{n_{C_3H_6 \text{ consumido}}}{263,34}$$

$$n_{C_3H_6 \text{ consumido}} = 0,12 \cdot 263,34$$

$$n_{C_3H_6 \text{ consumido}} \cong 31,601 \text{ mol/h}$$

Da estequiometria da reação, a proporção entre C_3H_6 e C_3H_6O é de 1:1, logo a quantidade de C_3H_6 consumida, é igual a quantidade de C_3H_6O produzida

EX13 Um sistema contínuo é utilizado para a síntese de cloreto de vinila (C_2H_3Cl), através da reação entre eteno (C_2H_4) e cloreto de hidrogênio (HCl): $C_2H_4 + HCl \rightarrow C_2H_3Cl + H_2$. A alimentação fresca fornece 500 mol/h de C_2H_4 e 400 mol/h de HCl. Parte da corrente de saída do reator, contendo reagentes não convertidos, é reciclada, resultando em uma corrente total de entrada no reator com 700 mol/h de eteno e 600 mol/h de HCl. A reação atinge uma conversão de 50 % em relação ao eteno por passagem. Calcule:

- A quantidade de C_2H_3Cl produzida. Resp.: 350 mol/h
- A vazão molar da corrente reciclada. Resp.: 400 mol/h
- A composição molar da corrente de saída do reator. Resp.: 26,9 %, 19,2 %, 26,9 %, 26,9 %
- A fração da saída do reator que é reciclada. Resp.: 30,8 %

EX14 Na produção de amônia via processo Haber-Bosch, o nitrogênio e o hidrogênio reagem conforme a equação: $N_2 + 3 H_2 \rightleftharpoons 2 NH_3$. Uma alimentação fresca composta por 100 mol/h de N_2 e 300 mol/h de H_2 é combinada com uma corrente de reciclo antes de entrar no reator. Após a reação, 200 mol/h de amônia são obtidos, e a fração não reagida de N_2 e H_2 é inteiramente reciclada ao sistema. Baseado numa conversão de N_2 , por passe, de 25 %, determine a vazão molar da corrente de reciclo. Resp.: 1200 mol/h

EX15 Na produção de óxido de etileno (C_2H_4O) por oxidação parcial do eteno, temos a seguinte reação principal: $C_2H_4 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow C_2H_4O$. Uma alimentação fresca desconhecida, constituída de etileno e oxigênio, é combinada com uma corrente de reciclo, antes de entrar no reator. A corrente de reciclo, de 400 mol/h, apresenta 37,5 % de C_2H_4 e 62,5 % de O_2 . Na saída do reator, constata-se 325 mol/h de óxido de etileno. Não há subprodutos significativos, e a corrente de saída passa por uma separação completa do C_2H_4O , com o restante sendo reciclado.

- a) Calcule a composição molar da corrente fresca. Resp.: 66,7 %, 33,3 %
- b) Calcule a conversão de etileno, por passe. Resp.: 68,4 %

EX16 Na produção de metanol, ocorre a reação: $CO + 2 H_2 \rightleftharpoons CH_3OH$. Como matéria prima, usa-se uma corrente contendo 26 % de CO, 68 % de H_2 e restante inertes. A conversão no reator não ocorre de maneira completa, de tal maneira que os reagentes não convertidos são reciclados. Devido a presença de inertes, uma purga de 230 mol/h é feita, cuja composição é 30 % de CO, 60 % de H_2 e restante inertes. Após a saída do reator, um sistema de membranas separa efetivamente o metanol das demais substâncias, numa corrente de vazão 150 mol/h. Sabendo que a relação R/P (reciclo/purga) é de 2,5, pede-se:

- a) A vazão de carga fresca. Resp.: 383,333 mol/h
- b) a razão R/F. Resp.: 1,5 mol/mol
- c) A vazão da carga combinada. Resp.: 958,333 mol/h
- d) O teor limite de inerte na entrada do reator. Resp.: 8,4 %
- e) A conversão de CO, por passe. Resp.: 55,1 %

EX17 Em um processo de oxidação de SO_2 para a formação de SO_3 , ocorre a reação: $2 SO_2 + O_2 \rightleftharpoons 2 SO_3$. Uma alimentação fresca de 240 mol/h de SO_2 e 120 mol/h de O_2 , com 3 % de inerte, entra no processo. A conversão por passe é de 30 %. Como a conversão não é total, o sistema opera com reciclo, de tal maneira que os reagentes não convertidos retornam ao reator, admitindo que a razão reciclo/fresca vale 3. Para evitar o acúmulo de inerte, a purga é dimensionada para manter, na entrada do reator, um teor abaixo de 5 %. Determine:

- a) A vazão da corrente de reciclo. Resp.: 1400 mol/h
- b) A vazão da purga. Resp.: 40 mol/h
- c) A vazão de produto obtido. Resp.: 180 mol/h

EX18 Considere o processo de produção de ácido nítrico, onde o NO é oxidado a NO₂ segundo: $2 \text{ NO} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{ NO}_2$. Neste processo, a carga combinada que alimenta o reator fornece 1472 mol/h de NO e 736 mol/h de O₂. O reator tem conversão por passe de 40%. Após a separação total de NO₂, os gases não convertidos retornam, para serem misturados a carga fresca. Como o processo é cíclico, há acúmulo de N₂ (inerte), e uma purga é necessária, a fim de manter o teor de N₂ na entrada do reator abaixo de 8 %. Sabendo que 5,06 % dos gases não convertidos são purgados, calcule

a) A taxa de produção de NO₂. Resp.: 588,8 mol/h

b) As vazões de reciclo e purga necessárias para manter o teor de N₂ abaixo do limite especificado. Resp.: 1440,05 mol/h, 76,75 mol/h

c) A vazão da corrente fresca e sua composição molar. Resp.: 959,95 mol/h, 66 %, 33%, 1 %

EX19 Amônia é produzida pela reação entre nitrogênio e hidrogênio. A alimentação fresca é alimentada a taxa de 200 kmol/h com reagentes em proporções estequiométricas e com teor de argônio de 1 %. A alimentação fresca é misturada com uma corrente de reciclo de taxa 600 kmol/h para formar a carga combinada que deverá ter um teor máximo de 2,5 %. O efluente do reator passa por um processo de separação de onde saem duas correntes, uma líquida contendo toda a amônia formada e uma outra gasosa, contendo os reagentes e os inertes. Estes gases são reciclados para o reator e, para evitar o acúmulo de inerte no reator, uma corrente de purga é retirada do reciclo. Sabendo que a conversão por passe no reator é de 17 %, determine:

- a) A composição da carga de processo. Resp.: 24,75 % N₂ e 74,25 % H₂.
- b) A taxa da corrente purgada. Resp.: 66,667 kmol/h
- c) A produção de amônia. Resp.: 66,3 kmol/h

EX20 Em um processo de obtenção do etanol hidratado pela hidrólise de eteno, o gás eteno e o vapor de água presentes no gás de carga contém 1% de gases inertes. Antes de entrar no reator, o gás de carga é misturado com uma corrente de gás de reciclo, obtido após a separação do etanol hidratado, com uma razão R/F de 2,5 mol/mol. O gás efluente do reator vai para um separador onde o etanol hidratado é removido e o gás restante é dividido em duas correntes, uma de reciclo e outra de purga. Calcule a razão molar purga/reciclo para que o teor de inertes na entrada do

reator não ultrapasse 2,5% molar, tendo como base de calcula 100 mol de carga fresca. Resp.: 0,129 mol/mol

EX21 Na operação de uma unidade de amônia sintética, entra no reator uma mistura de nitrogênio-hidrogênio na proporção de 1:3, obtendo-se uma conversão de 25 %. A amônia formada é separada por condensação e os gases não convertidos são reciclados ao reator. A mistura inicial contém 0,20 partes de argônio por 100 partes de mistura. O limite de tolerância de argônio que entra no reator é de 5 partes por 100 partes de mistura. Calcular a fração de recirculação que deve ser purgada. Resp.: 1,04 %

EX22 Etileno é hidratado cataliticamente em processo contínuo de modo a produzir etanol. A alimentação contém 1 % molar de inertes que não podem ser acumulados no sistema e devem ser purgados em quantidade tal que seu teor na entrada do reator não ultrapasse 2,5 %. Calcular a purga a ser realizada no sistema para uma alimentação de 200 kmol/h de etileno e água com um reciclo de 500 kmol/h. Resp.: 64,5 kmol/h.

EX23 Um dos processos de produção de etanol consiste na hidratação catalítica do etileno. A reação não se complementa satisfatoriamente numa única passagem no reator, motivo pelo qual a maior parte do etileno é reciclado. A relação molar água:etileno na entrada do reator é de 0,6 de modo a atingir uma conversão de etileno de 4,2 % por passe no reator. Considerando que a carga de processo tenha 0,05 % molar de inertes, calcule a fração dos gases reciclados que deverá ser purgada para manter o teor de inertes na entrada do reator abaixo de 1 %. Resp.: 2,05 %.

EX24 Metanol é produzido pela reação entre monóxido de carbono e gás hidrogênio. A carga fresca é alimentada com reagentes em proporções estequiométricas e com teor de 4 % de N₂. A carga fresca é misturada com uma corrente de reciclo na razão R/F = 4 mol/mol para formar a carga combinada que deverá ter teor de no máximo 8,8 % de N₂. O efluente do reator passa por um processo de separação de onde saem duas correntes; uma líquida, contendo todo o metanol formado, e uma corrente gasosa, contendo os reagentes e os inertes. Estes gases são reciclados para o reator

e, para evitar acúmulo de inertes no reator, uma corrente de purga é retirada do reciclo.

Calcule:

- a) A conversão por passe no reator. Resp.: 13,16 %
- b) O rendimento de metanol. Resp.: 62,5 %
- c) A razão em quantidade de matéria purga/carga fresca. Resp.: 0,4 mol/mol
- d) A razão em quantidade de matéria purga/reciclo. Resp.: 0,1 mol/mol

EX25 O metanol é sintetizado a partir de monóxido de carbono e hidrogênio em um reator catalítico. A alimentação virgem do processo de vazão 100 mol/h contém 32 % molar de monóxido de carbono, 64 % molar de hidrogênio e 4 % molar de nitrogênio. Esta corrente é misturada com uma corrente de reciclo na proporção 5 mol de reciclo/mol de alimentação para formar a alimentação do reator, que contém 13 % molar de nitrogênio. O efluente do reator passa por um condensador de onde saem duas correntes, a corrente líquida contendo essencialmente todo metanol formado e uma corrente gasosa contendo o monóxido de carbono, o hidrogênio e o nitrogênio. A corrente gasosa é dividida em duas frações, uma removida do processo como purga e a outra reciclada. Calcule:

- a) Taxa de produção do metanol. Resp.: 24,3 mol/h
- b) Vazão molar da corrente purgada. Resp.: 27 mol/h
- c) Composição da corrente purgada. Resp.: 14,8 % N_2 , 28,4 % CO e 56,8 % H_2

REFERÊNCIAS

ASHRAFIZADEH, Saeed A.; TAN, Zhongchao. **Mass and energy balances: basic principles for calculation, design, and optimization.** Cham: Springer, 2019.

BRASIL, Nilo Índio do. **Introdução à engenharia química.** 3ª edição. Editora Interciência, 2013

CERRO, Ricardo L.; HIGGINS, Brian G.; WHITAKER, S.. **Material balances for chemical reacting systems.** 1ª edição. Londres: CRC Press, 2022.

COULSON, John Metcalfe et al. **Coulson & richardson's chemical engineering: chemical and biochemical reactors and reaction engineering.** 4. edição. Oxford: Elsevier, 2017.

ERWIN, Douglas. **Projeto de processos químicos industriais.** 2ª edição. Porto Alegre: Bookman, 2016

FELDER, Richard M.; ROUSSEAU, Ronald W.; BULLARD, Lisa G. **Princípios elementares dos processos químicos.** 4ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

GHASEM, Nayef; HENDA, Redhouane. **Principles of chemical engineering processes: material and energy balances.** 3ª edição. Londres: CRC Press, 2025.

HIMMELBLAU, David Mautner; RIGGS, James B. **Princípios básicos e cálculos em engenharia química.** 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

JÚNIOR, Alberto Colli Babino; CRUZ, Antonio José Gonçalves. **Fundamentos de balanços de massa e energia: um texto básico para análise de processos químicos.** 2ª edição. São Carlos: EdUFSCar, 2021

DEEN, Morton M. **Chemical engineering: an introduction.** Cambridge: Cambridge University Press, 2015.

PERLINGEIRO, Carlos Augusto G. **Engenharia de processos: análise, simulação, otimização, e síntese de processos químicos.** São Paulo: Blucher, 2005

SINNOTT, Ray Kenneth; TOWLER, Gavin P. **Chemical engineering design.** 6ª edição. Oxford: Elsevier, 2020.

TURTON, Richard et. al. **Analysis, synthesis, and design of chemical processes.** 4ª edição. Prentice Hall, 2012.

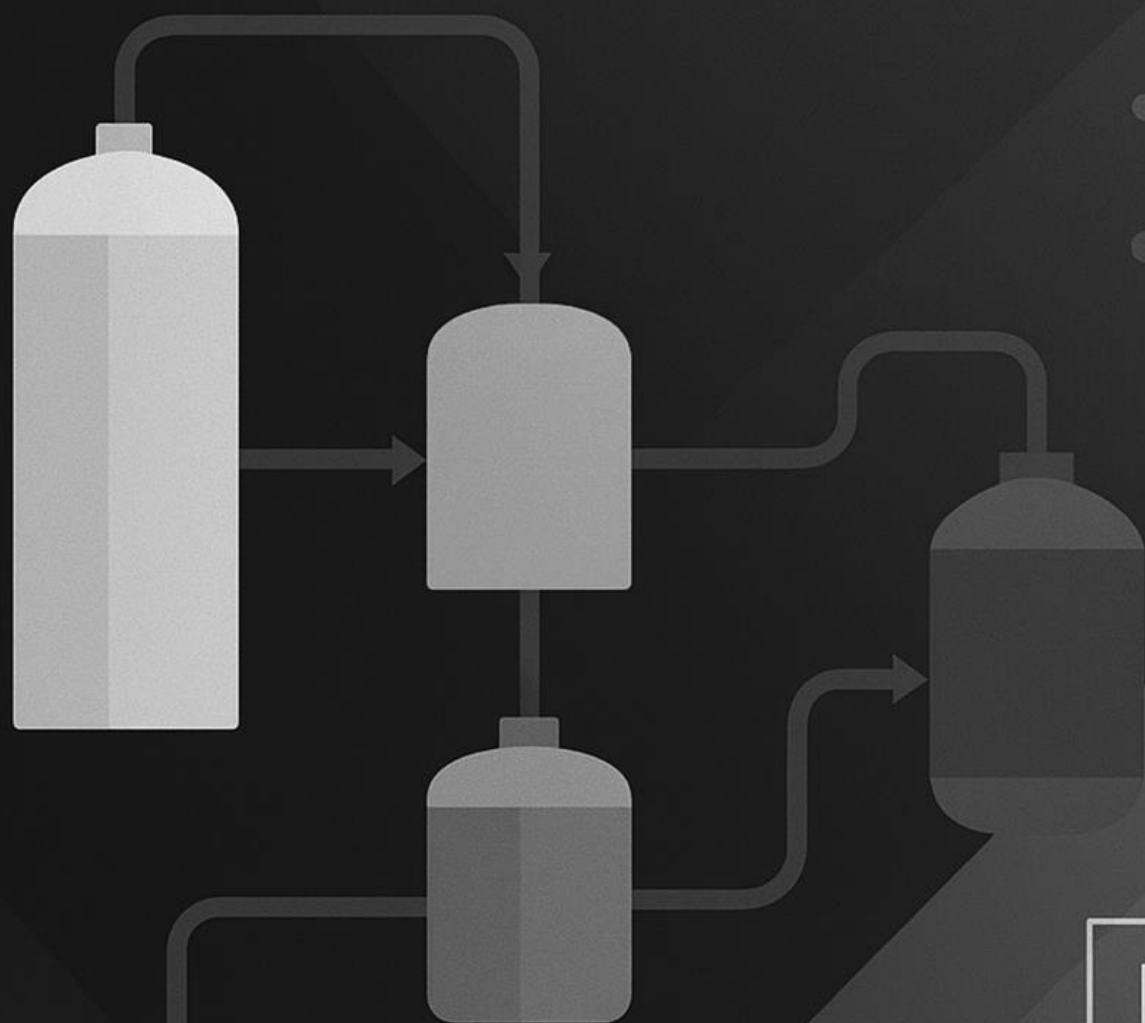
TURTON, Richard, SHAEIWITZ, Joseph A.. **Chemical Process Equipment Design.** Reino Unido: Prentice Hall, 2017.

UTGIKAR, Vivek. **Introdução à engenharia química: conceitos, aplicações e prática computacional.** 1ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2019



$$\rho - \rho\beta(V) = \sum_{i=1}^{\infty} \bar{\rho}_i(V)$$

$$\delta = \frac{\Delta \Delta^z}{S \Delta^z}$$



F

C