

## 9. BALANÇO DE MASSA

“A massa do universo (em estudo) não pode ser criada ou destruída”; esta é a lei sobre a qual estão baseados os balanços de massa.

O balanço de massa representa uma peça fundamental do projeto de equipamentos e torna-se complexo quando tratamos de processos constituídos por diversos equipamentos interligados. Esta complexidade aumenta em sistemas multifásicos, heterogêneos e com reações químicas. Por isso, é necessária uma sistematização das informações disponíveis para que seja possível uma solução clara e objetiva.

### 9.1. Tipos de balanço de massa

#### 9.1.1. Operação em Batelada

A massa não cruza as fronteiras do processo durante o tempo da batelada. O sistema é alimentado e os produtos são retirados de uma só vez, no início e ao final do tempo de processo, respectivamente. Assim, o processo ao longo da batelada se comporta como um sistema fechado. Normalmente, esta estratégia de operação é usada para produzir pequenas quantidades de especialidades químicas, produtos sazonais ou feitos por encomenda.

#### 9.1.2. Operação Contínua

Há, continuamente, a passagem de massa através das fronteiras do processo através das correntes de entrada e de saída. Desta forma o processo se comporta como um sistema aberto. Esta operação é característica de grandes volumes de produção, como ocorre, por exemplo, no refino do petróleo e na indústria petroquímica.

### 9.2. Conservação da Massa em um volume de controle

A equação de balanço de massa em um volume de controle é dado pela seguinte equação:

$$\frac{dm}{dt} = \Sigma \dot{m}_e - \Sigma \dot{m}_s \quad (5)$$

Onde:

- $dm/dt$  = Taxa temporal de variação de massa contida no interior do volume de controle entre os instantes  $t$  e  $t+\Delta t$ ;
- $\Sigma \dot{m}_e$  = Taxa total de massa entrando no volume de controle no instante  $t$ ;
- $\Sigma \dot{m}_s$  = Taxa total de massa saindo do volume de controle no instante  $t + \Delta t$ ;

### 9.3. Formulação em Regime Permanente

Para um volume de controle em regime permanente, temos que a taxa de variação temporal de massa no interior do volume de controle não varia ao longo do tempo, portanto temos:

$$\Sigma \dot{m}_e = \Sigma \dot{m}_s \quad (6)$$

### 9.4. Balanço de massa em cada componente

Para realizar os balanços de massa, temos que a capacidade,  $C$ , da fábrica é de 1440 toneladas por mês, sabendo que o dia de trabalho é dividido em três turnos de 8 horas cada, totalizando 24 horas de funcionamento, durante 5 dias da semana, com isso temos que a capacidade da nossa fábrica é de 3 toneladas por hora.

$$C = \frac{1440 \text{ toneladas/mês}}{4 \text{ semanas} * 5 \text{ dias} * 24 \text{ horas}} = 3 \text{ toneladas/hora}$$

Além dos dados já mencionados, é importante acrescentar que apesar de considerarmos nosso sistema como intermitente de forma global, entretanto logo a frente considerarmos o escoamento de massa em alguns equipamentos como permanente, pois, esta consideração nos permite obter valores mais pontuais e precisos referente aos processos isoladamente.

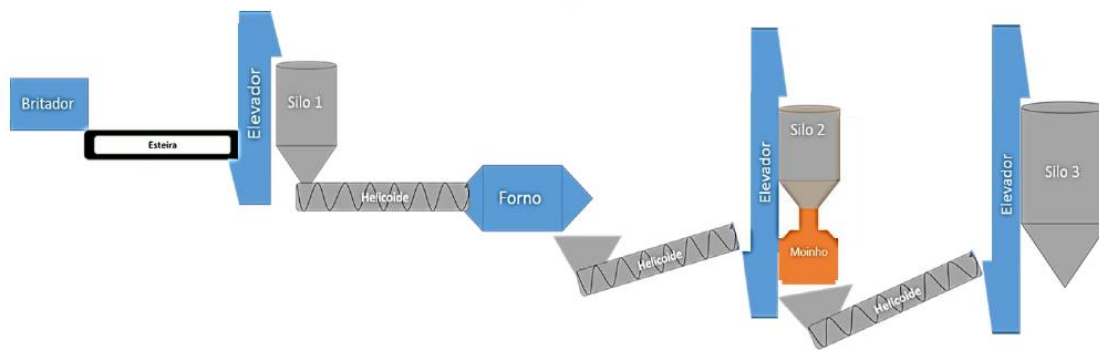
Entretanto nossos processos acabam sendo influenciados por fatores externos, os quais ditam a forma como os processos devem ocorrer ou quando um equipamento deve ou não ser utilizado; em uma calcinadora deve atentar-se para o consumo elétrico, pois equipamentos como os britadores são equipamentos de grande porte que demandam muita potência elétrica, em horários de pico as companhias elétricas costumam aumentar o preço do kWh, podendo assim chegar ao dobro do valor. De acordo com os dados fornecidos pela Celpe, a tarifa amarela que determinam os horários de pico e suas classes é representada abaixo através de uma tabela:

	Faixa de horário	Valor do kWh (R\$)
Pico	17h30 e 20h29	2,01645641
Intermediário 1	16h30 às 17h29	2,01645641
Intermediário 2	20h30 às 21h29h	2,01645641
Fora de pico	21h30 às 16h29	0,41000708

Como o projeto é elaborado mediante tais fatores citados, em nossa planta dispomos de silos (pulmões), aos quais reservamos boa parte do produto que será posteriormente calcinado, podemos fazer com que os silos suportem um quantitativo de matéria, para que seja possível operar a fábrica normalmente nos períodos em que o britador estará desligado, como representado anteriormente na tabela os períodos aos quais a utilização do britador deve ser interrompida são nos horários de pico e intermediários 1 e 2.

Com isso podemos fazer o balanço de massa em cada componente, como segue:

## 9.5. Balanço de massa nos equipamentos



**Figura 14.** Diagrama de fluxo dos componentes.

### BRITADOR

Considerações:

- Regime Permanente;
- Propriedades constantes;
- Processo contínuo.

Portanto temos, que toda massa que entra no britador é igual a que sai, sem acumular.

$$\Sigma \dot{m}_e = \Sigma \dot{m}_s$$

para que seja possível o funcionamento do britador apenas 8 horas diárias, para que não haja altos consumos elétricos, devemos garantir que nosso silo seja capaz de segurar a capacidade de um dia de trabalho, utilizando um silo de 80 toneladas somos capazes de fornecer 4,44 toneladas/batelada, como nosso britador funcionará 8 horas, logo ao fim de seu turno ele deve fornecer uma massa que compense tanto a parcela processada durante sua inatividade quanto a parcela que está sendo retirada do silo em seu período de operação. Logo, durante um período de 16 horas serão removidas 42,67 toneladas, este valor é obtido dividindo-se 16 horas em períodos de 1,5 horas (período de uma batelada) e multiplicando seu valor pelas 4 toneladas que será processada por batelada, sobrando 37,33

toneladas dentro do britador, portanto em 8 horas nosso britador deve processar 42,67 + 21,33 toneladas, onde os 21,33 representam as toneladas que serão processadas durante o período de operação, totalizando as 64 toneladas. Parcelando 64 em 8 partes temos que o britador deve processar 8 toneladas/hora de matéria prima.

#### ESTEIRA

Considerações:

- Regime Permanente;
- Propriedades constantes;
- Processo contínuo.

Portanto temos, que toda massa que entra na esteira é igual à que sai.

$$\Sigma \dot{m}_e = \Sigma \dot{m}_s$$

Toda a massa que entra na esteira, 12 t/h, sai e vai para o elevador.

#### ELEVADOR

Considerações:

- Regime Permanente;
- Propriedades constantes;
- Processo contínuo.

Portanto temos, que toda massa que entra no britador é igual à que sai, sem acumular.

$$\Sigma \dot{m}_e = \Sigma \dot{m}_s$$

Toda a massa que entra no elevador, 8 t/h, sai e vai para o silo 1.

#### SILO 1

Considerações:

- Regime transiente;
- Acumula massa;
- Processo em batelada.

Além das considerações usuais devemos levar dois fatores em conta, no processo de calcinação a matéria prima perde água, esta que representa 25% da massa que entra, além de que nosso britador durante horários aos quais a taxa do kWh é maior deve permanecer desligado para se haver uma economia, equivalente há 5 horas diárias, estes fatores implicam em uma necessidade de acúmulo de matéria para o processo permaneça contínuo sem sofrer com essas interferências.

Toda massa que entra no silo 1 é igual à que sai mais a que acumula.

$$\Sigma \dot{m}_e = \Sigma \dot{m}_s + \dot{m}_{acumula}$$

Entra massa à um fluxo de 8 t/h, acumula 4 t durante um período de uma hora, pelo fato de neste momento o forno estar operando em sistema fechado, ao passar uma hora e meia a massa sai em direção ao forno, fica reservada uma parcela para compensar as horas em que o britador irá ficar parado, sendo assim 4 t/h, porém em um fluxo maior, proveniente do helicóide que acelera o processo de escoamento da matéria para o forno.

É necessário que seja injetado no forno 4t em um curto período de 5min, logo utilizamos o helicóide para impulsionar a matéria para o forno, como desejamos despejar 4t e para questões de padronização iremos trabalhar em termos de toneladas/hora, logo abaixo para motivos de esclarecimento apresentamos o método que utilizamos para transformar 4t/5min em um fluxo em horas:

$$4t \longrightarrow 5min$$

$$X \longrightarrow 60min$$

Aplicando uma regra de três obtemos:

$$X = (4 * 60) / 5$$

$$X = 48t/h$$

Portanto temos o novo fluxo de saída de 48 t/h, que equivale a 0,80 t/min.

### HELICÓIDE

Considerações:

- Regime Permanente;
- Propriedades constantes;
- Processo contínuo.

Temos, que toda massa que entra no britador é igual à que sai.

$$\Sigma \dot{m}_e = \Sigma \dot{m}_s$$

Toda a massa que entra na esteira, á um fluxo de 48 t/h, o valor alto desse fluxo de massa é dado para que seja minimizado o tempo de alimentação do forno. Com esse fluxo, o transportador helicoidal alimenta o forno com 4 toneladas em apenas 5 min.

### FORNO ROTATIVO

Considerações:

- Regime transiente;
- Acumula massa;
- Processo em batelada.

Temos, que toda massa que entra no forno rotativo é igual à que sai mais a que acumula.

$$\Sigma \dot{m}_e = \Sigma \dot{m}_s + \dot{m}_{acumula}$$

A massa que vem do helicóide, 4 tons, chega no forno numa taxa de 48 t/h, levando apenas 5 min para carregar o forno que tem uma capacidade de 6,25t. Ao receber essa massa, o forno começa a operar em sistema fechado, de tal forma que nesse momento nem entra nem sai massa. Após 1:20 horas de operação, toda a massa sai em um intervalo de tempo muito pequeno de 5 min.

Ao sair do forno, a massa passa por mais um helicóide e um elevador, com um fluxo de 3,0 t/batelada até chegar no segundo silo que alimentará o moinho, os 25% de massa de água retirados da matéria serão enviados a uma torre de condensação, para que esta seja reutilizada em outros processos.

## MOINHO

Considerações:

- Regime Permanente;
- Propriedades constantes;
- Processo contínuo.

Portanto temos, que toda massa que entra no moinho é igual à que sai.

$$\Sigma \dot{m}_e = \Sigma \dot{m}_s$$

A massa que sai do segundo silo, 3 t, entra no moinho à uma taxa de 3 t/batelada, sai em na mesma taxa e vai para o silo (3) finalizando assim o processo de produção do gesso.

## 9.6 Projeto do silo 1

Para nosso estudo foi de interesse estimar a altura do silo para que ele comporte a massa desejada e não possua uma altura muito elevada, para isso alguns cálculos foram necessários, a começar pelos dados, temos que nosso silo deve possuir um diâmetro de saída de 30 centímetros, um diâmetro de 3 metros e a parte cônica não deve ultrapassar dois metros, além do mais temos a densidade da gipsita como sendo de  $2320 \text{ kg/m}^3$ .

Primeiramente devemos determinar qual volume as 80 toneladas devem ocupar baseando-nos na massa específica:

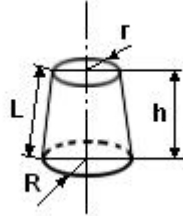
$$\rho = \frac{\text{massa (m)}}{\text{volume (V)}}$$

Onde obtemos:



$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{80 \times 10^3}{2320} = 34,48 m^3$$

Como nosso silo possui uma parte cônica devemos calcular o volume que este pode reservar, para isso utilizaremos a fórmula:



**Figura 15.** representação do tronco de cone

$$V = \frac{1}{3} \pi h (R^2 + Rr + r^2) = \frac{1}{3} \pi 1 (3^2 + 3 \times 0,30 + 0,30^2) = 10,46 m^3$$

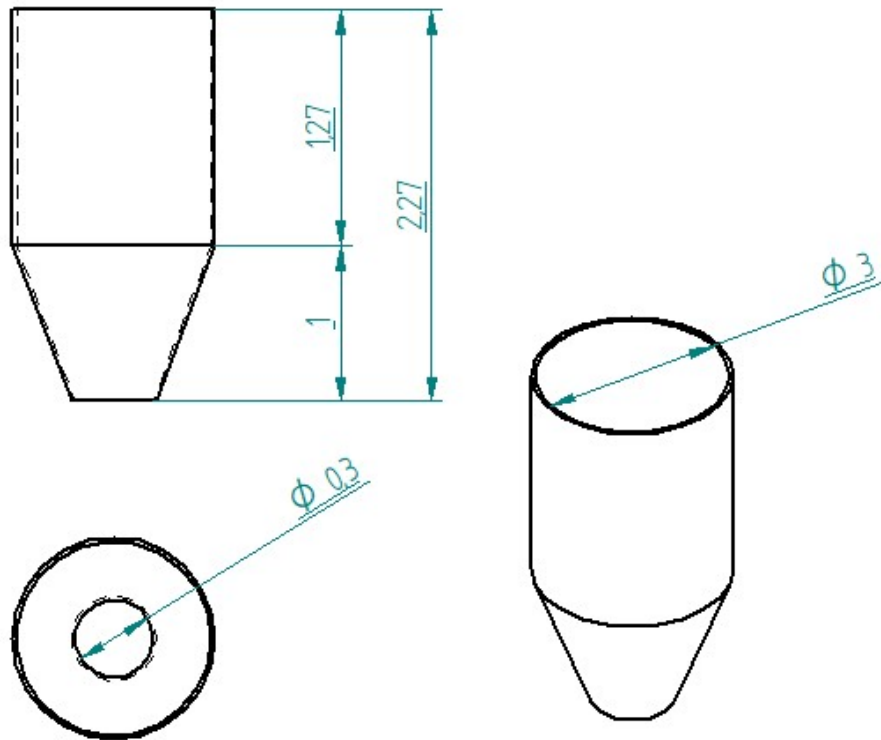
Para nossa parte cilíndrica será utilizado  $R = 3m$  sendo que este deve ocupar o restante da massa:

$$V = 2\pi R h$$

Onde isolando  $h$  obtemos:

$$h = \frac{V}{2\pi R} = \frac{24,02}{2\pi 3} = 1,27$$

A partir desses dados foi-se projetado um silo e a seguinte dimensão foi obtido seguinte esboço do silo:



**Figura 16** – esboço do silo 1

Logo nosso silo 1 deve possuir uma altura de 2,27 metros, ou para que tenhamos uma margem de reserva maior podemos aplicar uma altura de 2,5 metros ou até mesmo 3 metros caso este superdimensionamento seja viável.

Tabela 8. Quantidade de cada equipamento e a capacidade de cada um.

Equipamento	Quantidade	Capacidade
Britador	1	12,5 [t]
Esteira	1	12,5 [t]
Elevador de caneca	3	12,5 [t]
Silo de armazenagem	3	40 [t]
Helicoide	1	73 [t/h]
Forno	1	12,5 [t]
Helicoide	2	12,5 [t]

Moinho	1	12,5 [t]
--------	---	----------