



FABRICAÇÃO DE AÇÚCAR

Unidade II - Produção de Açúcar Cristal

1. Fluxograma da Produção de Açúcar



Figura 1.1 - Fluxograma

2. Tipos de Açúcar

a) Açúcar refinado granulado: Puro, sem corantes, sem umidade ou empedramento e com cristais bem definidos e granulometria homogênea. Seu uso maior é na indústria farmacêutica, em confeitos, xarope de transparência excepcional e mistura seca.

b) Açúcar branco (tipo exportação): Há dois tipos para exportação: o branco para consumo direto (humano), com baixa cor (100), produzido diretamente em usina, sem refino; e o branco para reprocessamento no destino, também produzido diretamente em usina, sem refino, cor 400.

c) Açúcar cristal: Açúcar em forma cristalina produzido diretamente em usina, sem refino. Muito utilizado na indústria alimentícia na confecção de bebidas, massas, biscoitos e confeitos.

d) Açúcar demerara ou bruto: Produto de cor escura, que não passou pelo refino.

e) Açúcar mascavo: Úmido e de cor castanha, não passa por processo de cristalização ou refino. Usado na confecção de doces que não requeiram transparência.

f) Açúcar orgânico: Açúcar de granulação uniforme, produzido sem qualquer aditivo químico tanto na fase agrícola como na industrial, disponível nas versões clara e dourada. Segue padrões internacionais e certificação por órgãos competentes.

g) Açúcar refinado amorfo: É o mais utilizado no consumo doméstico, por sua brancura excelente, granulometria fina e dissolução rápida, sendo usado ainda em bolos e confeitos, caldas transparentes e incolores e misturas sólidas de dissolução instantânea.

h) Açúcar VHP: O açúcar VHP - Very High Polarization é o tipo mais exportado pelo Brasil. Mais claro que o demerara, apresenta cristais amarelados.

i) Açúcar de confeitador: Tem grânulos bem finos, cristalinos, é produzido na refinaria e destinado à indústria alimentícia, sendo muito utilizado no preparo de bolos, glacês, suspiros etc.

j) Xarope de açúcar invertido: Solução aquosa com 1/3 de glicose, 1/3 de sacarose e 1/3 de frutose, têm alto grau de resistência à contaminação microbiológica. De poder umectante e anticristalizante, é utilizado em produtos aditivados, com microbiologia e temperatura controladas, além de frutas em calda, sorvetes, balas, bebidas, massa, geléias, biscoitos, licores e bebidas carbonatadas.

l) Xarope simples ou açúcar líquido: Transparente e límpido é uma solução aquosa usada pela indústria farmacêutica e aplicado onde a ausência de cor é essencial, como bebidas claras, balas e outros confeitos.

Observação

Tudo vive em constante transformação, na maioria sempre para melhor e com mais qualidade. Com o açúcar não é diferente. Por exemplo, no nosso uso doméstico, viemos do açúcar mascavo para o açúcar cristal e, depois, para o açúcar refinado para fazer doces, bolos e outras inúmeras receitas do dia-a-dia. E o açúcar de uso industrial também mudou.

Antes o melhor era o VHP, mas agora também temos o VVHP (Very Very High Polarization), que possui Pol acima de 99,5° - enquanto que o VHP tem Pol abaixo de 99,3° - e cor mais baixa (ICUMSA entre 300 e 500 UI). É quase um intermediário entre os açúcares crus e os refinados.



Figura 2.1 - Tipos de Açúcar

3. Análise de Açúcar

- a) Cor: Análise que classifica o tipo de açúcar.
- b) Resíduo insolúvel: Determina sólidos insolúveis presentes na amostra.
- c) Umidade: Determina se o açúcar está úmido, pois se estiver forma grumos nos cristais prejudicando a qualidade do açúcar.
- d) Dextrana: É causada por uma bactéria que quando presente leva o açúcar a formar grumos e goma sendo prejudicial à qualidade do açúcar.
- e) Pol : Determina a pureza do açúcar.
- f) Cinzas: Determina a quantidade de substâncias inorgânicas presentes no açúcar.
- g) Pontos pretos: Determina a presença de pontos pretos (sujeiras, bagaçinha, fuligem, etc...) no açúcar
- h) Sulfito: Determina a quantidade de enxofre presente no açúcar, pois no processo de fabricação ele é usado para a clarificação dos caldos.

4. Determinação da Cor

O termo ICUMSA é a sigla da International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis (Comissão Internacional para Métodos Uniformes de Análise de Açúcar).

$$\text{ICUMSA (UI)} = \frac{(\text{Abs})}{b \times c} \times 1000$$

Abs: Leitura de absorbância a 420nm da solução

b: Comprimento interno da cubeta (cm)

c: Concentração de sacarose açúcarada (g/L) 20°C.

5. Especificação para Açúcar Cristal de acordo com a Cor

- Tipo 1: máximo 100 UI
- Tipo 2: máximo 150 UI
- Tipo 3: máximo 200 UI
- Tipo 4: acima de 200 UI

6. Tratamento do Caldo (Clarificação do Caldo)

6.1 Introdução

O caldo de cana bruto é opaco, de cor amarela pardacenta a esverdeado, mais ou menos escuro e viscoso. As impurezas do caldo podem ser classificadas como impurezas em suspensão (terra, areia, bagacilho) e impurezas solúveis (corantes, sais minerais).

A opacidade é causada pelos colóides, proteínas, pentosanas, pectina e compostos inorgânicos como sílica. A cor varia com a cana e com a energia do esmagamento e é dada pela clorofila, antocianina, sacaretina e substâncias cromógenas. A viscosidade do caldo é causada por gomas, pectinas, albuminas e sílica coloidal.

O pH do caldo varia de 5 a 6. A acidez aumenta nas canas queimadas, doentes, praguejadas, cortadas a mais de 24 horas, verdes e passadas.

Na clarificação visa-se separar do caldo a maior quantidade possível de impurezas dissolvidas e em suspensão, sem afetar a sacarose. Deve ser feita logo após a moagem para evitar a ação de fermentos e enzimas.

A clarificação pode ser realizada de várias formas segundo o tipo de açúcar a ser produzido, ou se o caldo vai ser usado para fermentação a etanol. A clarificação consta de vários processos e combinações de processos, que variam de acordo com o tipo de açúcar que se quer obter e com a região.

A clarificação por simples decantação do caldo é impossível. Somente se pode consegui-la após a floculação dos colóides, pois o caldo tem que ser considerado na clarificação como um sistema coloidal muito complexo, no qual o meio de dispersão é a água.

No caldo à temperatura ambiente, predominam os colóides com pontos isoelétricos entre pH 7,0 e 7,2. Nessa faixa há a melhor floculação possível. A deposição da parte floculada arrasta quase todo o resto por adsorção.

6.2 Métodos de Clarificação do Caldo

Existem 5 métodos utilizados no processo de clarificação do caldo de cana que possuem destaque:

1. Caleação, calagem ou defecação - uso de cal virgem (CaO);
2. Sulfitação - uso de anidrido sulfuroso (SO_2);
3. Fosfatação - uso de ácido fosfórico (P_2O_5);
4. Carbonatação - anidrido carbônico (CO_2);
5. Uso de óxido de magnésio.

TRATAMENTO DE CALDO P/ FABRICAÇÃO DE AÇÚCAR

FLUXOGRAMA DE TRATAMENTO DE CALDO

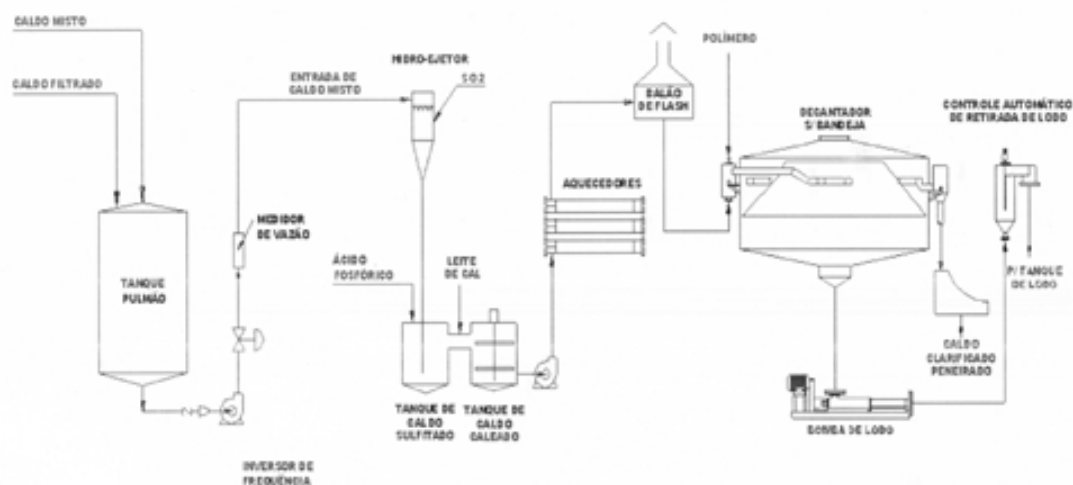


Figura 6.2.1 - Fluxograma de Tratamento do Caldo

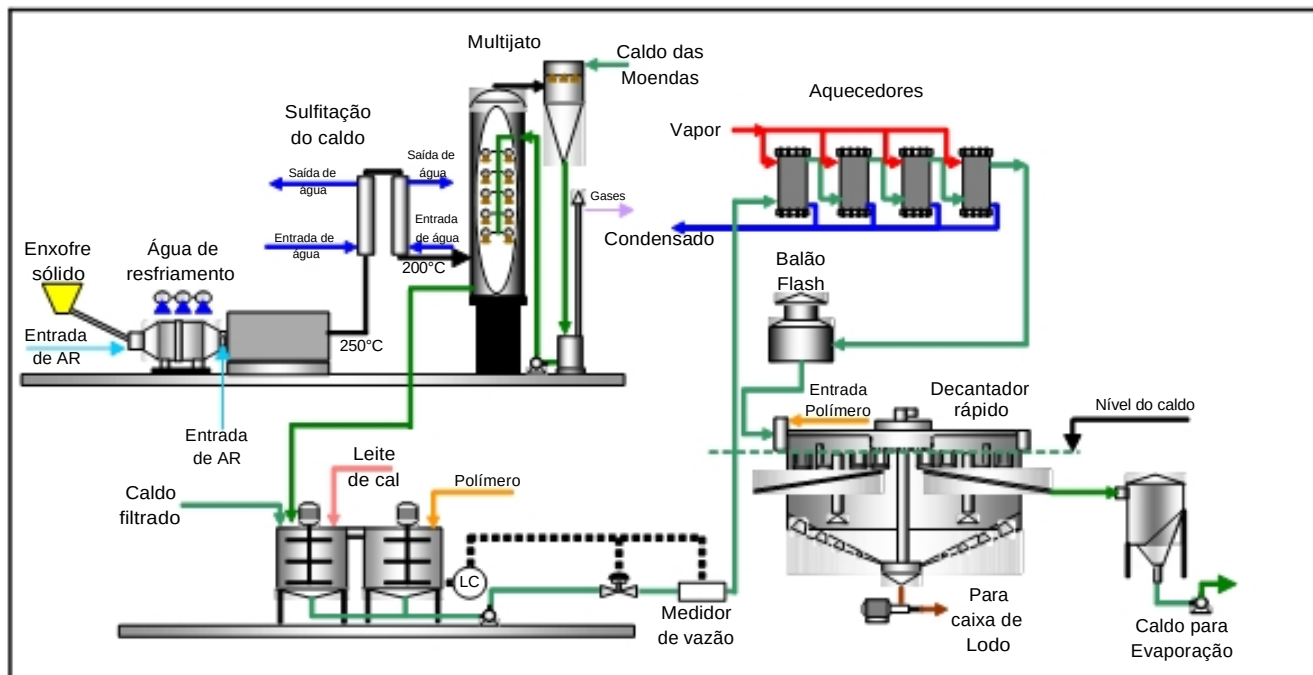


Figura 6.2.2 - Tratamento do Caldo

SETOR DE TRATAMENTO DE CALDO

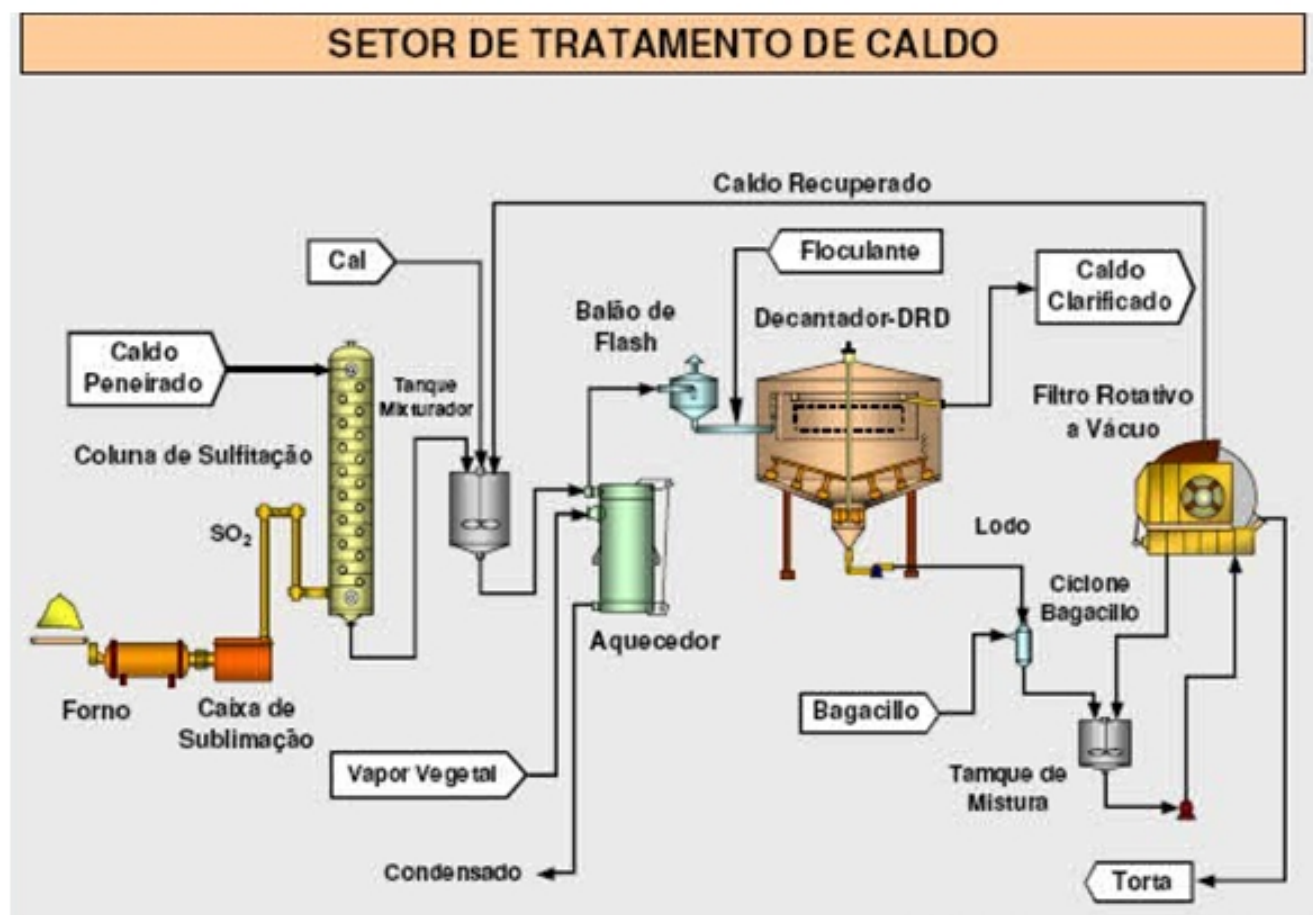


Figura 6.2.3 - Setor de Tratamento do Caldo

6.3 Tratamento de Caldo para Fermentação em Destilarias Anexas

O tratamento de caldo mais recomendado para a produção de álcool para destilarias anexas é aquele que prevê peneiramento, caleação, aquecimento, decantação e resfriamento.

As peneiras mesmo quando arranjadas em cascata, com eficiência gradativa de retenção, não conseguem remover mais que 80% das impurezas em suspensão, passando argila e bagacilho para o processo.

O tratamento que permite a eliminação de argila e bagacilho, após o peneiramento e desaeração, é o aquecimento, seguido de decantação. Estas duas impurezas entopem os bicos das centrífugas impedindo uma separação eficiente do fermento.

O aquecimento do caldo a 105°C reduz a carga microbiana contaminante e o volume de espuma na fermentação.

6.4 Tratamento de Caldo para Fermentação em Destilarias Autônomas

O tratamento de caldo para produção de álcool para as destilarias autônomas é o mesmo das destilarias anexas, acrescido da operação de concentração do caldo que permite:

- ☐ A elevação do teor de açúcar total do mosto para fermentação implica em aumento do teor de álcool no vinho, aumentando a capacidade de produção da destilaria e diminuindo o consumo de vapor;
- ☐ Desnaturação de proteínas, reduzindo a viscosidade do caldo e diminuindo a formação de espumas;
- ☐ Menor desgaste dos bicos das centrífugas provocando menor perda de fermento (o que permite menor consumo de ART do mosto).

7. Sulfitação

Consiste em promover o contato do caldo com o gás sulfuroso (SO₂) para sua absorção, o que implica em:

- Redução do pH: Auxilia a precipitação e remoção de proteínas do caldo.
- Diminuição da viscosidade do caldo: Conseqüentemente do xarope, massas cozidas e méis, facilitando a cristalização da sacarose nos cozimentos;
- Formação de complexos com açúcares redutores: Impede a sua decomposição e controla a formação de compostos coloridos em alcalinidade alta;
- Preservação do caldo: Contra alguns microrganismos;
- Prevenção do amarelamento do açúcar (Cristal Branco): Por algum tempo, durante o armazenamento;
- O caldo decanta-se mais rapidamente e ocorre melhor eliminação de fosfatos e ceras, permitindo uma filtração melhor;

- Eliminar materiais corantes do caldo, possibilitando a fabricação do açúcar branco;
- Transformar em compostos ferrosos incolores os sais de ferro presentes no caldo devidos a desgastes de moendas e tubulações;
- O SO_2 é um redutor enérgico e atua sobre as substâncias corantes do caldo, reduzindo a sua cor.

A principal reação química ocorre com o hidróxido de cálcio usado na calagem na etapa seguinte, produzindo um precipitado de sulfito de cálcio que, ao ser eliminado na decantação, permite a obtenção de um caldo límpido e claro.

O efeito mais importante da sulfitação, quando da clarificação do caldo de cana é sua ação inibidora de formação de cor, proveniente da reação entre açúcares redutores e aminoácidos (reação de Maillard).

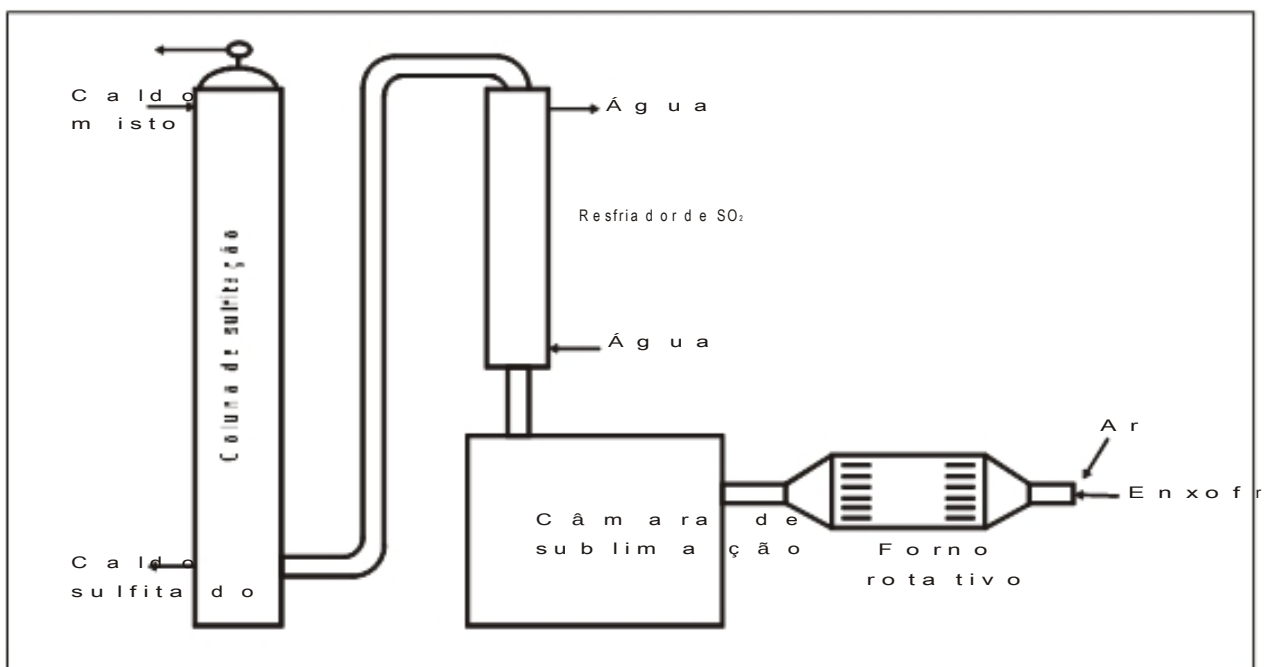


Figura 7.1 - Diagrama do Processo

7.1 Métodos de Sulfitação

a) Sulfitação fria do caldo bruto

- Sulfitar em pH na faixa de 3,8 a 4,5;
- Efetuar calagem até pH 7,0;
- Aquecer até 105°C e enviar para o clarificador;

b) Sulfitação quente do caldo bruto

- Aquecimento entre $65 - 75^\circ\text{C}$;
- Sulfitação em pH na faixa de 3,8 a 4,5;
- Efetuar calagem até pH 7,0;

- Aquecer até 105°C e enviar para o clarificador;

c) Sulfitação quente do caldo bruto (Java)

- Aquecimento até 50°C;
- Calagem;
- Sulfitação até pH 7,2;
- Aquecer até 105°C e enviar ao decantador. Este processo é muito usado na Índia e reduz a quantidade de cal e de anidrido sulfuroso.

d) Calagem fracionada e sulfitação do caldo bruto

- Aquecimento até 55 ou 60°C;
- Pré-calagem com 400 g de CaO por T.C.
- Sulfitação com 0,4 g de SO₂ por litro de caldo;
- Calagem final até pH 7,4;
- Aquecimento a 105°C e envio ao decantador.

Existem variantes dos processos gerais de sulfitação citados anteriormente.

A sulfitação é o primeiro tratamento químico que o caldo recebe na usina, e consiste na passagem do gás anidrido sulfuroso (SO₂) ao caldo aquecido. O caldo passa em contato direto com o SO₂, ambos escoando em contra corrente, em colunas de absorção de gases, contendo bandejas perfuradas (pratos), as quais aumentam o contato gás-líquido.

O SO₂ age de forma complexa ao reagir com o caldo, formando um sal pouco solúvel que será removido na seção da decantação, auxiliando na clarificação do caldo.

Além disso, o SO₂ ajuda a converter compostos coloridos em incolores, impedindo o desenvolvimento de cor pela oxidação e inibindo o desenvolvimento de cor pela reação de escurecimento entre açúcares redutores e aminoácidos.

O gás SO₂ é obtido pela queima de enxofre, que reage com o oxigênio, como mostra a reação exotérmica: $S + O_2 \rightarrow SO_2$.

Infelizmente, nem todo o enxofre queimado se transforma em SO₂, pois nem sempre se consegue parar a reação, podendo formar SO₃, devido à alta temperatura que pode ser atingida pela liberação da reação de formação de SO₂.

7.2 Inconvenientes da Presença de SO₃ no Gás de Sulfitação

Formar ácido sulfúrico, que pode causar corrosão nos equipamentos e inversão na sacarose;

Formação de sulfato de cálcio que é mais solúvel que o sulfito de cálcio, aumentando o teor de sais no caldo e causando incrustações nos evaporadores;

Aumenta o consumo de enxofre. Para minimizar a formação de SO₃, alguns cuidados

devem ser seguidos:

Controle da vazão de ar na alimentação do forno, bem como sua umidade;

Resfriamento dos gases de combustão contendo o SO_2 para em torno de 250°C , onde a taxa de formação do SO_3 é mínima.

A combustão do enxofre e a temperatura:

- 119°C : fusão do enxofre;
- $119 - 180^\circ\text{C}$: enxofre fundido aumenta viscosidade e escurece
- Acima de 180°C : a viscosidade diminui;
- 250°C : inicia-se o processo de combustão;
- $250 - 400^\circ\text{C}$: inicia a formação de SO_3 ;
- $400 - 500^\circ\text{C}$: intervalo de temperatura no qual a formação do SO_3 é ótima;

A queima do enxofre é realizada em fornos constituídos por um tambor rotativo, câmara de combustão e resfriador. O consumo de enxofre situa-se em torno de 350 g de enxofre por tonelada de cana, e o pH do caldo que deixa a torre está em torno de 4,5. Na produção do açúcar orgânico, o caldo não passa pela sulfitação.

7.3 Processo de Sulfitação

O caldo é enviado a um pré-aquecimento em trocador de calor tipo placa ou casco tubo, onde é aquecido pela troca de calor com um fluido quente (que em muitos casos é vinhaça) até a temperatura desejada.

A seguir o caldo é introduzido na parte superior de uma coluna de sulfitação e os gases pela parte inferior, ocorrendo assim, a absorção do SO_2 pelo caldo.



Figura 7.3.1 - Forno Rotativo para Queima de Enxofre

Alguns técnicos afirmam que se pode sulfitar antes ou após a calagem, que o que realmente importa é chegar ao mesmo pH final do caldo decantado. Mas no geral, principalmente no Brasil, o processo preferido é a sulfodefecação, ou seja, primeiro faz-se a sulfitação.

Se a calagem é feita primeiro, o caldo fica exposto mais tempo a pH alcalino, favorecendo a formação de gomas, como a dextrana, inconveniente por levar a entupimentos de canalizações e interferir na cristalização do açúcar. Além do mais, a rapidez da decantação e o volume do lodo dependem do pH do meio (reação do meio) no qual se forma o precipitado.

O lodo sendo formado num meio alcalino será hidratado, portanto forma um maior volume de lodo que será enviado para a filtração. O lodo formado em meio ácido é mais compacto e apresenta maior velocidade de decantação.

Na prática admite-se:

- Calagem antes da sulfitação: decantação mais lenta, maior volume de lodo, necessita maior capacidade de filtração;
- Sulfitação antes da calagem: melhor para canas não maduras, decantação mais rápida, menor volume de lodo, necessita menor capacidade de filtração;

A sulfodefecação para uma boa coagulação das impurezas deve ser conduzida:

- pH de 3,8 a 4,0 numa temperatura de 30 a 40°C;
- pH de 5,1 a 5,3 numa temperatura de 70 a 75°C.

Numa temperatura mais baixa a absorção do SO_2 no caldo é maior. Na reação química entre o Ca(OH)_2 e o SO_2 forma-se CaSO_3 . Uma sulfitação exagerada conduz à formação de $\text{Ca(HSO}_3)_2$ que é muito mais solúvel em água que o sulfito.

A formação do bissulfito é inconveniente, pois durante o aquecimento e evaporação do caldo o bissulfito é transformado em sulfito de cálcio insolúvel, que se deposita nos equipamentos.

Incrustações nos evaporadores implicam em gastos com limpeza química e mecânica, além de maior gasto de vapor. Além disso, implica em açúcar com maior teor de cinzas (minerais).

7.4 Manutenção do pH

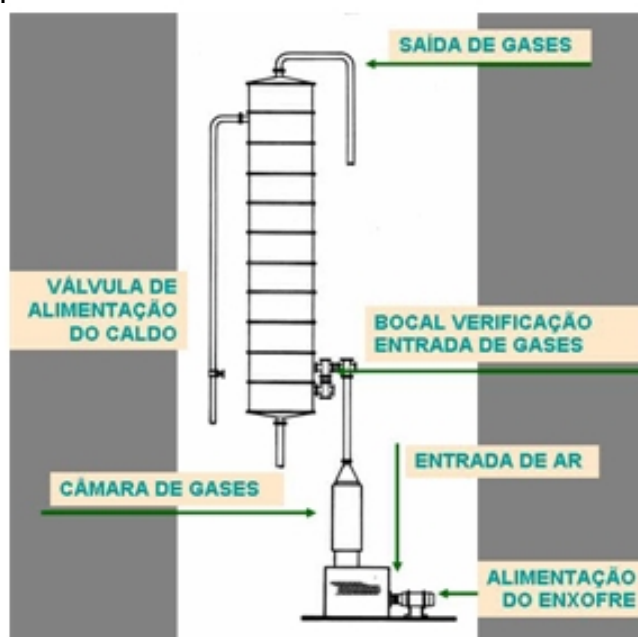


Figura 8.1.1 - Coluna de Sulfitação

Para manter o pH estipulado dos caldos da saída das 3 colunas, deve-se:

- Distribuir o caldo nas colunas.
- Controlar a alimentação do enxofre.
- Regular a entrada de ar após o forno.
- Verificar a entrada de gases nas colunas.
- Controlar a temperatura da água de resfriamento da câmara de gases.

7.5 Camisa de Resfriamento

Resfriamento do gás para temperatura abaixo de 200°C

- ☐ Abaixo de 230°C para reduzir a formação de SO_3 .
- ☐ Acima de 120°C para evitar o empedramento.

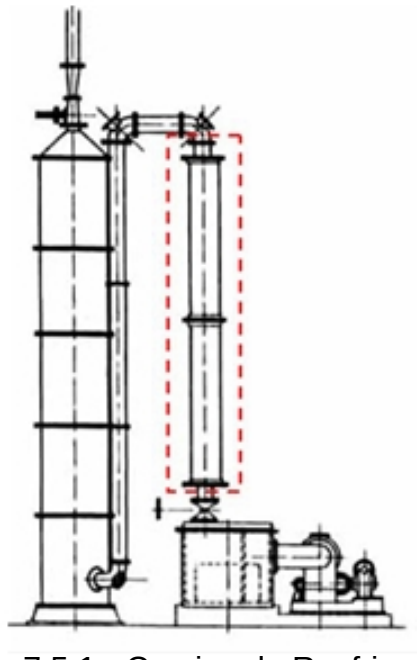


Figura 7.5.1 - Camisa de Resfriamento

9. Fosfatação

O fosfato, expresso em ácido fosfórico é encontrado na cana sob duas formas principais: como fosfatos solúveis do caldo e combinado nas proteínas das células. A clarificação de caldos deficientes em fosfato natural é muitas vezes auxiliada pela adição de fosfatos.

Em geral, caldos contendo menos de 0,03% de fosfatos são considerados deficientes. A adição de fosfatos até este nível assegura maior formação de flocos de fosfato de cálcio, mas teores de fosfato da ordem de 0,09% podem implicar em aumento do volume de lodo e mais baixa velocidade decantação.

A fonte normalmente utilizada para aumentar o fosfato natural presente na cana é o ácido fosfórico, mas é comum usar fosfato de amônia, de manuseio mais fácil e mais barata que o ácido fosfórico.

A fosfatação auxilia na remoção de materiais corantes e parte dos colóides do caldo. O precipitado formado com a cal é o fosfato tricálcico. O ácido fosfórico é acrescentado antes da calagem.

Tem a possibilidade de substituir a sulfitação, mas no geral deve ser considerado como um auxiliar da clarificação e é usado numa dosagem de 250 a 300 ppm (mg/L).

Tabela 9.1 - Uso do Ácido Fosfórico (P_2O_5)

Vantagens	Aplicação
Caldo mais claro	Varia de acordo com a quantidade de P_2O_5 presente no caldo
Alta taxa de sedimentação	Dosagem ideal normalmente entre 200 e 300 ppm
Lodo mais concentrado	Nunca superior a 600 ppm □ Formação de flocos leves que decantam lentamente, além de causar incrustações.
Melhor filtrabilidade do lodo	
Menor cor no açúcar	
Açúcar de melhor qualidade	

10. Carbonatação

O caldo é aquecido, tratado com leite de cal e depois com CO_2 . Há precipitação de carbonato de cálcio, que englobará as matérias primas corantes e as gomas, tornando um complemento da clarificação.

É um método usado na produção de açúcar de beterraba e muito pouco citado para açúcar de cana. Pode ser simples quando se usa apenas um tratamento com CO_2 e uma filtração e duplo quando ocorrem duas operações de cada.

Há também um método com tratamento com gás carbônico e calagem simultaneamente. Para caldo de cana o maior inconveniente é a caramelização dos açúcares redutores, que escurece o produto.

11. Caleação ou Calagem

11. Introdução

Normalmente o pH do caldo de cana varia entre 4,8 - 5,5, sendo que as canas maduras apresentam um pH mais elevado, e nas canas passadas e queimadas, este valor tende a um limite mais baixo.

Esta acidez pode ser alterada para menos, mediante a adição de álcalis, assim como o leite de cal $Ca(OH)_2$,

o qual constitui a base fundamental de todos os processos de clarificação do caldo de cana, por formar compostos insolúveis no mesmo, sendo estes, de fácil remoção por decantação e filtração.

O objetivo da caleação é a reação com o sulfito e com o ácido fosfórico (P_2O_5), formando sulfito e fosfato de cálcio, que são insolúveis em pH neutro e se precipitam na decantação. O pH do caldo atinge a faixa de 7,2 a 7,8.

Pela adição de leite de cal, além da formação de compostos insolúveis, verifica-se a coagulação de grande quantidade de colóides, e ainda uma elevação na concentração

hidroxiniônica do caldo, pois se trabalhando com este em pH próximo à neutralização, evita-se os produtos escuros resultantes da decomposição dos açúcares redutores. Sob a ação do hidróxido de cálcio, quando este é aplicado em excesso ocorre à inversão da sacarose, com conseqüente diminuição no rendimento da indústria, causado pela alta alcalinidade do caldo em processamento.

A adição ou dosagem de leite de cal ao caldo proveniente da sulfitação é feita de maneira contínua com controle automático nos tanques dosadores.

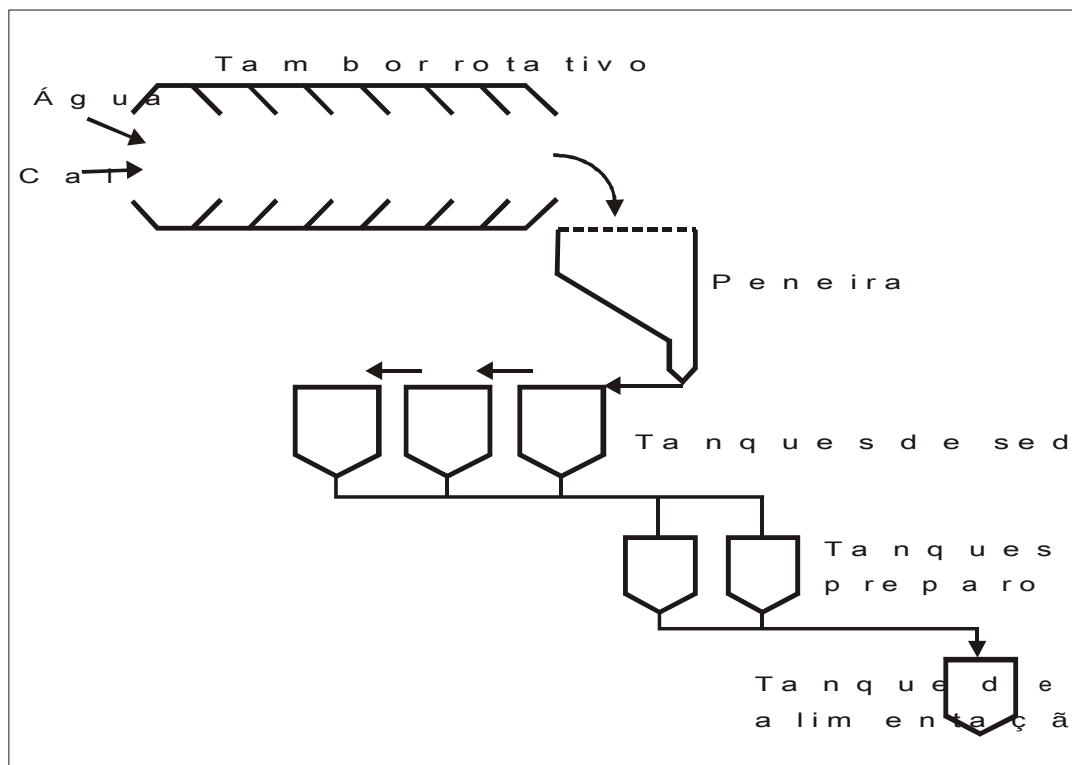


Figura 11.1.1 - Sistema de Calagem

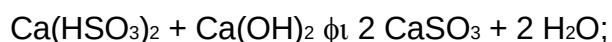
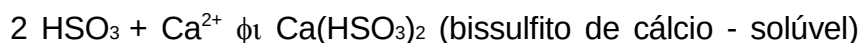
11.2 Ação da Cal sobre os Caldos

Os ácidos orgânicos são eliminados, as matérias albuminóides são coaguladas, uma parte das matérias corantes torna-se insolúvel. Com a caleação ocorre pequeno aumento da pureza dos caldos (0,5 a 2,0 pontos).

A purificação é física, formando um precipitado que engloba as impurezas físicas e as arrasta consigo. Assim, o objetivo da caleação é a reação com o sulfito e com o ácido fosfórico, formando sulfito e fosfato de cálcio, que são insolúveis em pH neutro e se precipitam na decantação.

11.3 Parâmetros

- Preparação do leite de cal: $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$ (exotérmica). O leite de cal é preparado em dois tanques, dos quais um se esvazia, enquanto o outro enche, dotados de agitador, girando a 8 - 10 rpm. A capacidade de cada tanque é de 90 -120 minutos de operação da usina.



Cal hidratada pura apresenta 76% de CaO $(56/74) \times 100\%$;

- Calagem até pH na faixa de 7,2 a 7,4 (processo de caleação de caldo sulfitado).

Fundamental o controle automático do pH;

Consumo de cal: 500 - 800 g de CaO por tonelada de cana;

- Um bom processo de caleação apresenta um teor de CaO do caldo clarificado não superior a 400 mg/L.

11.4 Métodos de defecação

a) Calagem Fria

- O caldo recebe calagem até pH na faixa de 7,2 a 8,3 com média em 7,8;
- Em seguida enviado aos aquecedores, aquecido até ebulição (105°C);
- Após aquecedores, o caldo passa por um tanque de flash e é enviado ao decantador;
- A decantação é completada após um tempo que varia de 60 a 180 minutos.

b) Calagem Quente

- Aquecimento do caldo a 70°C;
- Calagem até pH 7,8 e aquecimento até ebulição (105°C);
- Flash e decantador.

c) Calagem Fracionada e Aquecimento Duplo

- Calagem a pH 6,2 - 6,4;
- Aquecimento a 105°C;
- Nova calagem até pH de 7,6 a 8,2;
- Aquecimento a 105°C;
- Tanque de flash e a seguir decantação;
- O pH final do caldo clarificado deve situar entre 6,8 a 6,9.

d) Calagem com Ebulição

- Aquecimento a 105°C;
- Flash seguido de calagem até pH 7,8;
- Decantação;
- O pH final deve se situar entre 6,8 e 6,9.

e) Adição de Cal com Sacarato

- Este método consiste na mistura de leite de cal com caldo clarificado ou xarope, mantendo o contato acima de 5 minutos, dando tempo para formação de sacarato de cálcio. Então é feita a adição da cal com esta mistura de sacarato ao caldo bruto. Afirma-se que o caldo fica mais claro e mais puro;

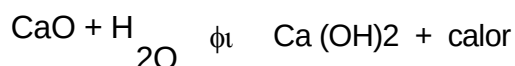
- Deve ser formado sacarato monocálcico e para isso a temperatura deve ser abaixo de 58°C e a relação sacarose para óxido de cálcio deve ser acima de 6,1 para 1;
- Diminui o problema de entupimentos de tubulações.

Um processo típico de uso de sacarato é:

- 20% de caldo misto: aquece até a ebulição, caleia até pH 11,0 a 11,5;
- 80% de caldo misto, pH 6,0-6,5 (frio), aquece até ebulição;
- Misturam-se as duas partes e envia para o balão flash (pH = 7,0).

11.5 Características da Cal

A cal utilizada no processo de clarificação do caldo de cana é obtida pela dissociação do carbonato de cálcio, gerando CaO e CO₂. O CaO reage com H₂O para formar a cal hidratada através de uma reação exotérmica, conforme segue:



Normalmente para tal preparação existem duas caixas sendo a primeira com entrada de água pela parte superior. Na primeira caixa é adicionado CaO e água, e com auxílio de um agitador mecânico, faz com que em solução fique pré-homogenizada, em seguida a solução é transferida para a segunda caixa, obtendo uma solução na faixa de 4,0 a 7,0° Baumé.

A água a ser utilizada no preparo do leite de cal não deve ser dura, sendo recomendado o uso de águas condensadas. O tempo de hidratação e maturação da cal é da ordem de 7,7 horas. Esta solução é agitada e bombeada para o processo sendo que o excesso retorna para as caixas de preparação.

A acidez ou a alcalinidade final do caldo clarificado entrando na evaporação não é indiferente. Na obtenção de açúcar branco é necessário um caldo caleado ligeiramente ácido. Para açúcar demerara pode-se deixar o caldo levemente alcalino. O pH alcalino implica em aumento de tempo de cozimento, dificultando a cristalização. O tempo de cozimento é cerca de 20% maior para um pH 7,5 do que para pH 7,0.

12. Aquecimento do Caldo

O aquecimento do caldo apresenta os seguintes objetivos:

Acelerar as reações químicas que levam à formação de compostos insolúveis;

Promover a coagulação das proteínas e a floculação máxima possível dos colóides do caldo;

Reduzir a solubilidade dos sais de cálcio e a viscosidade do meio e acelerar o processo de decantação e clarificação do caldo;

Saturar os sais formados nas reações químicas;

Controle microbiológico (consequência);

Diminuir a densidade e viscosidade;

Provocar a floculação.

O aquecimento é feito em trocador de calor, geralmente do tipo casco e tubos, do tipo vertical / horizontal ou trocadores de placas.

O aquecedor (normalmente trocador tipo casco tubo) é formado por uma calandra tubular: o caldo circula por dentro dos tubos e o vapor em volta dos tubos. Os aquecedores (trocadores de calor) podem ser de simples ou de múltiplos passes.

A temperatura do caldo deve ser elevada acima do ponto de ebulição na pressão atmosférica, podendo chegar a 110°C na entrada do decantador, sendo a temperatura de aquecimento mais usada 105°C e a velocidade de circulação do caldo considerada ótima se situa na faixa de 1,5 a 2,0 m/s.

Esse aquecimento é feito pelo vapor vegetal gerado nos evaporadores. Há grande incidência de incrustações nos tubos dos aquecedores, e por isso deve ser feita uma limpeza periódica nos mesmos, para evitar perdas na transferência de calor. Um aquecedor típico de caldo é mostrado na Figura 5.

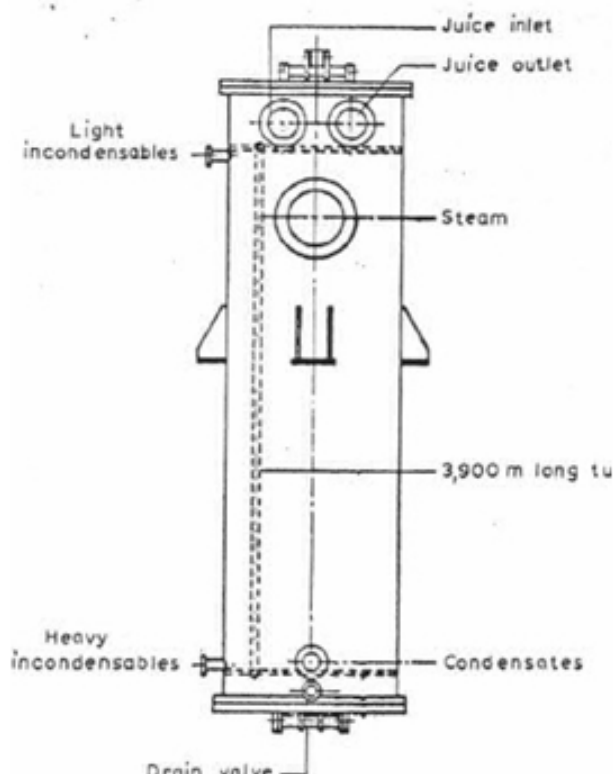


Figura 6 - Esquema de um Aquecedor de Caldo com vários passes

13. Balão de Flash

É um simples recipiente cilíndrico, colocado imediatamente antes e acima do decantador, com uma chaminé aberta para a atmosfera e ao qual o caldo vindo dos aquecedores, chega tangencialmente.

Como o caldo está a 105°C, há uma evaporação espontânea, assim que chega a este recipiente, à pressão atmosférica.

Este fenômeno libera todas as partículas em suspensão das bolhas de ar que ali estão agregadas e que impediriam a deposição das partículas de bagaço (bagacilho) durante a clarificação, se não fossem retiradas.

Portanto, por meio da ebulição espontânea, há a eliminação do ar dissolvido no caldo que dificulta a decantação das impurezas mais leves (bagacilho). O único parâmetro a ser controlado é a temperatura do caldo, a 105°C, ou seja, acima do ponto de ebulição para haver o flasheamento.

14. Decantação

14.1 Introdução

É a separação física entre sólido e líquido por diferença de densidade. A velocidade de decantação é regida pela lei de Stokes:

$$v = \frac{K \cdot D^2 (d_1 - d_2)}{\mu}$$

- ☐ v: velocidade de queda da partícula em cm/s, □
- ☐ D: diâmetro da partícula em cm,
- ☐ d1: densidade da partícula em g/cm³,
- ☐ d2: densidade do fluido em g/cm³,
- ☐ μ: viscosidade do fluido em poise ou centipoise,
- ☐ k: constante que depende da forma da partícula.

A decantação é a mais importante etapa do processo de clarificação, que visa purificar o caldo pela remoção de compostos coagulados por sedimentação. Basicamente, pode-se dizer que um açúcar de boa cor e poucas impurezas depende da qualidade da decantação.

O processo de decantação se dá nos decantadores que podem ser do tipo convencional ou rápido.

A decantação é um processo contínuo, que leva aproximadamente três horas no decantador convencional, e uma hora no decantador rápido. É usual a aplicação de floculantes na entrada do decantador, visando agrupar os flocos formados nas reações químicas, deixando-os mais pesados para que decantem mais rapidamente.

Os floculantes são polímeros, que podem ser tanto catiônicos quanto aniônicos. Eles recebem a denominação de polieletrólitos e são poliacrilamidas parcialmente hidrolisadas.

Melhoram a floculação, a decantação torna-se mais rápida e o volume de lodo torna-se menor e não modificam o pH. A dosagem dos floculantes é da ordem de 1 a 3 g/TC, usados em solução numa concentração de 0,01 a 0,05%.

A capacidade de um clarificador é determinada pelo tempo de retenção necessário para permitir a sedimentação do lodo. A área disponível para a sedimentação constitui o maior fator para garantir a eficiência. Quanto maior a área por unidade de volume, mais rápida a decantação e menor o volume de lodo obtido.

Os principais parâmetros da sedimentação são: •

pH do caldo clarificado: 6,8 a 7,0;

- Transmitância: > 60%;
- Concentração do lodo: 45 a 55% de impurezas; •

Teor de P_2O_5 < 30 ppm;

- Tempo de retenção: 30 min à 3 horas;
- Flocos pequenos: falta de polímero;
- Caldo turvo: pH baixo ou falta de sulfito;
- Impurezas flotando: temperatura baixa;
- Caldo com cor amarelo forte: pH alto.

Os decantadores devem ser esvaziados a cada 6 semanas, para evitar problemas de contaminação.

O decantador separa o lodo do caldo alimentado, que resulta em um caldo mais puro e límpido, e a esse caldo se dá o nome de caldo clarificado. O lodo retirado do decantador possui uma grande quantidade de sacarose.

Este lodo passa por um processo de filtração gerando um caldo filtrado que é utilizado na produção de álcool. Na Figura 8 é apresentado um esquema de um decantador convencional com bandejas.

14.2 Decantação do Caldo de Cana

O caldo de cana após sofrer tratamento químico e térmico é colocado em repouso para que as impurezas sejam removidas por decantação ou emersão (flotação).

Inicialmente esta operação era realizada de forma intermitente em caixas individuais, como hoje é feito em pequenos engenhos de açúcar mascavo. As usinas atualmente utilizam processos contínuos nessa operação.

Para se acelerar a velocidade de decantação, o processo mais utilizado é o aumento do tamanho das partículas, especialmente no caso das suspensões coloidais, onde o movimento browniano e a repulsão elétrica não permitem a decantação.

Em geral a aglomeração se consegue pela utilização de flocculantes, que podem atuar de diversas formas:

- ☐ Substâncias eletrolíticas: descarregam as cargas elétricas,
 - ☐ Substâncias coagulantes: provocam a formação de precipitados gelatinosos, ☐
- Polieletrólitos: que consistem em polímeros de alto peso molecular e de cadeia longa com um grande número de pontos eletricamente ativos.

14.3 Tipos de Decantadores

14.3.1 Decantador Rápido (Sem Bandejas)

Equipamento onde o caldo é alimentado através de um anel concêntrico, sendo o caldo claro retirado por calhas e o lodo retirado pelo fundo com auxílio de pás raspadoras.

Tabela 14.3.1 - Vantagens e Desvantagens do Decantador Rápido

Vantagens	Desvantagens
Baixo tempo de retenção (1 hora).	Bastante sensível às variações de fluxo, sendo obrigatória à automação.
Baixas perdas por inversão.	Apresenta um alto consumo de polímeros (4 g/ m ³ de caldo).
Menor volume e um menor tempo de liquidação.	Produz um lodo menos concentrado aumentando a recirculação de filtrado e conseqüentemente as perdas.
Menor custo de implantação.	Não decanta bem caldos com Brix elevado (maior que 18%).
	Não é aconselhável para a fabricação de álcool por necessitar de tratamento químico.

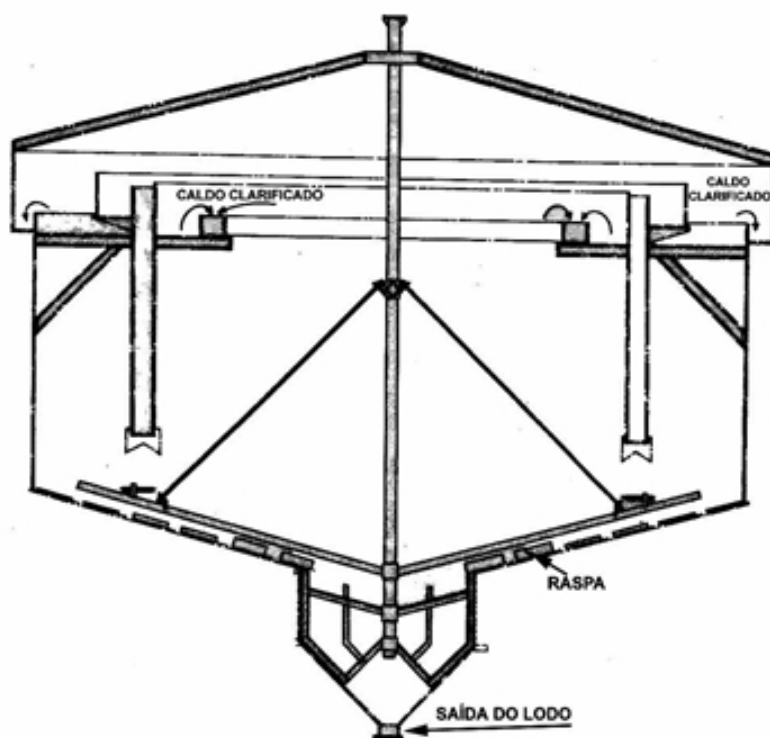


Figura 14.3.1 - Decantador Rápido (Sem Bandejas)

14.3.2 Decantador Convencional

O decantador mais utilizado nas usinas de açúcar é do tipo Dorr (Dorr Oliver). É constituído de um cilindro de fundo e tampa cônicos. Internamente é composto por seções ou compartimentos (em torno de 5), separadas por bandejas cônicas paralelas ao fundo, as quais possuem uma abertura central que faz a comunicação entre os compartimentos, constituindo o espaço por onde saem as borras.

Este canal é atravessado por um eixo que sustenta suportes para os raspadores em número de quatro. O eixo central é acionado por motor elétrico, e movimenta a uma rotação entre 10 e 12 rph.

O caldo é alimentado pela parte central descendo pelo tubo central onde é distribuído para as bandejas. O caldo claro é retirado por serpentina externa e sua vazão é controlada através de canecas. O lodo é retirado por raspadores e direcionado para o fundo.

Visando assegurar uma menor quantidade de bagacilhos ou resíduos sólidos no açúcar e no mosto, o caldo clarificado passa por uma filtração adicional. Essa filtração pode acontecer tanto na peneira rotativa que se encontra após os decantadores quanto nas peneiras abertas.



Figura 14.3.2 (a) - Decantador Convencional

Tabela 14.3.2 - Vantagens e Desvantagens do Decantador Convencional

Vantagens	Desvantagens
Alta estabilidade a qualquer variação de fluxo.	Maior tempo de retenção (2,5 horas).
Apresenta lodo mais concentrado e menor recirculação de caldo filtrado.	Maior queda de pH.
Baixo consumo de polímeros.	Volume inoperante na parte superior, acima da primeira bandeja, onde pode ocorrer pontos mortos aumentando o nível de infecção.
Decantação normal mesmo com Brix elevado (> 18oBrix).	O caldo das bandejas inferiores recebe o lodo das bandejas superiores.
Alta estabilidade a qualquer variação de fluxo.	Alto custo de implantação.

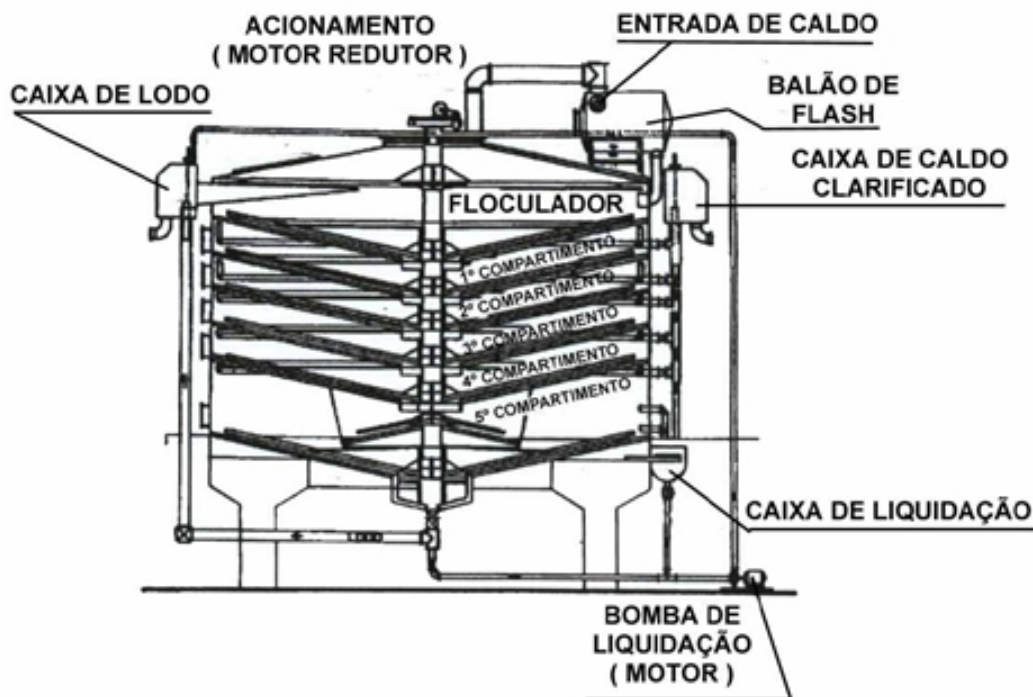


Figura 14.3.2 (b) - Decantador Convencional

14.3.3 Braço

Onde são fixadas as raspas, tendo cada compartimento formado por dois ou quatro braços.

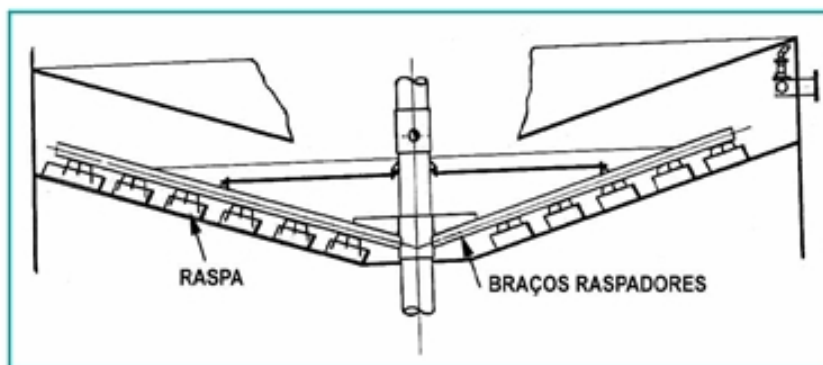


Figura 14.3.3 - Braço

15. Avaliação de um Sistema de Filtração

Um sistema de filtração deve alguns pré-requisitos para poder ser considerado como eficiente, que seriam:

- ☐ Apresentar baixa perda de sacarose na torta do filtro;
- ☐ Apresentar um caldo filtrado com baixa turbidez;
- ☐ Apresentar uma alta taxa de retenção de material insolúvel.

$$r = 100 \bullet \frac{\text{material insolúvel na torta}}{\text{Material insolúvel no lodo}}$$

Define-se filtração como a separação de sólidos suspensos em um líquido pela passagem através de um meio permeável (meio de filtragem).

15.1 Filtração do Lodo ou Tratamento do Lodo

O objetivo da filtração é recuperar açúcar do lodo, retornando-o ao processo na forma de caldo filtrado. O lodo removido dos decantadores possui uma considerável quantidade de açúcar que, portanto, deve ser aproveitado.

Após sair do decantador o lodo recebe uma pequena quantidade de polímero, que ajudará na separação das impurezas, e recebe também uma adição de bagacilho, que aumentará o rendimento dessa extração.

O caldo clarificado é enviado à fabricação, ou seja, mais freqüentemente, diretamente à evaporação.

O lodo deve ser primeiramente filtrado, para separar do caldo o precipitado contido, juntamente com os sais insolúveis formados e o bagacilho arrastado.

Existem certas condições necessárias para se obter uma boa filtração.

A filtração é uma operação difícil de ser regulada e que exige cuidados. Para reunir as melhores condições à sua realização, é preciso observar vários pontos:

Temperatura: A viscosidade dos caldos, sobretudo, das gomas e das ceras que decantam na superfície filtrante deve diminuir com o aumento da temperatura. É, portanto, conveniente filtrar o caldo a alta temperatura. Trabalhe-se, preferivelmente, acima de 80°C.

Reação: Os caldos alcalinos são mais facilmente filtrados que os caldos ácidos ou neutros. Geralmente acrescentava-se cal ao lodo, antes de filtrá-lo, deixando-o com um pH de 8 a 8,5. Isto era necessário com filtros-prensa, porém não com os filtros rotativos a vácuo.

Na fabricação do açúcar, utilizam-se normalmente Filtros-Prensa e Filtros Rotativos a vácuo.

15.2 Parâmetros da Filtração

- % de impurezas no caldo filtrado: 2 a 12% matérias sólidas em suspensão;
- Retenção ideal dos filtros: > 90% (rotativo apresenta em média 70%);
- Dosagem de bagacilho (adicionado ao lodo para formar a torta): 6 - 15 kg /TC (ou o suficiente para dar espessura adequada na torta do filtro);
- Umidade da torta: 70 a 75%;
- Pol da torta: o menor possível;

15.3 Filtro Prensa

Equipamento pouco usado hoje em dia na filtração do lodo, em função da grande mão de obra exigida e de sua capacidade relativamente baixa. A figura a seguir apresenta o esquema de funcionamento de um filtro prensa.

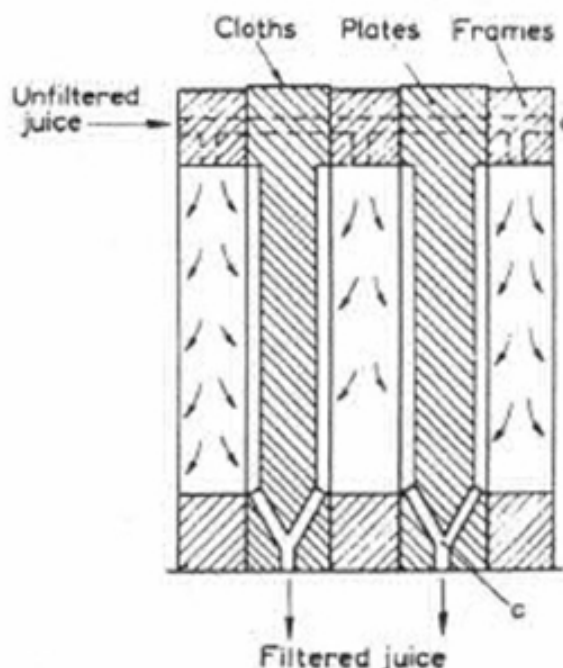


Figura 15.3.1 - Esquema de Funcionamento de um Filtro Prensa O

tempo de ciclo é aproximadamente:

- Descarga e Montagem: $\frac{3}{4}$ h;
- Filtração: $1 \frac{3}{4}$ h;
- Lavagem: $\frac{1}{2}$ h;
- Total do Ciclo: 3 h.

15.4 Filtro Rotativo



Figura 15.4.1 - Filtro Rotativo

O filtro rotativo a vácuo é composto de um tambor perfurado que gira em volta de um eixo horizontal e parcialmente submerso no líquido a ser filtrado. A periferia do tambor constitui a superfície filtrante, sendo esta dividida em 24 seções independentes, cada uma das quais ocupando 15° da circunferência e estendendo-se por todo o comprimento do tambor.

Cada uma destas seções é ligada individualmente a uma tubulação de vácuo. Figuras 11 e 12 ilustram tal equipamento. O tambor gira a uma rotação que varia de 0,1 a 0,5 rpm.

As fases de cada ciclo de filtração são as seguintes: formação e crescimento da torta, filtração, lavagem, secagem, quebra vácuo e descarga da torta, conforme Figura 11. Na suspensão de lodo a ser filtrada há a adição de bagacilho, na proporção de 6 a 15 kg por tonelada de cana para formação da torta na superfície do filtro.

Como pode ser observado na Figura 11, no filtro rotativo existem a região de baixo e de alto vácuo. O baixo vácuo (7 - 10 polegadas de Hg) evita a compactação da torta de sólidos e bagacilho, o que ocasionaria bloqueio da passagem de líquido. A formação de camada de torta porosa propiciará boas condições de lavagem da torta a seguir.

A seção submersa do filtro no tanque emerge do mesmo com a camada de torta formada, há uma transição para o alto vácuo, 20 -22 polegadas de Hg. Inicia-se uma sucção mais forte.

Ao ultrapassar a linha de centro horizontal do tambor, começa a fase de lavagem da torta com bicos pulverizadores com água aquecida, extraíndo o açúcar, fase conhecida como embebição.

A fase de secagem da torta sob a ação do alto vácuo vai até a metade de uma câmara, antes da borda superior da raspadeira. A capacidade e a eficiência da filtração estão ligadas à velocidade periférica do tambor.

Quanto mais lenta for esta rotação, melhor serão a lavagem e secagem da torta, fatores redutores da pol, com conseqüente redução da capacidade de extração do lodo dos decantadores.

O sistema de lavagem da torta consta de:

- Filtro Mause: 6 fileiras de 37 bicos;
- Filtro Zanini: 5 fileiras de 28 bicos.

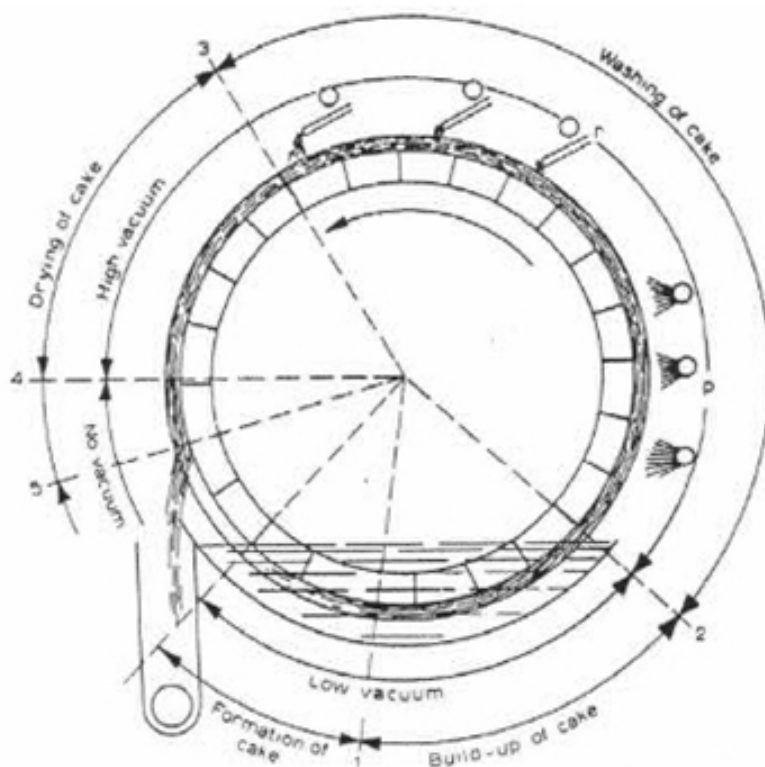


Figura 15.4.2 - Vista do Filtro Rotativo



Figura 15.4.3 - Detalhe da retirada da Torta formada no Filtro Rotativo.

15.5 Sistema de Vácuo

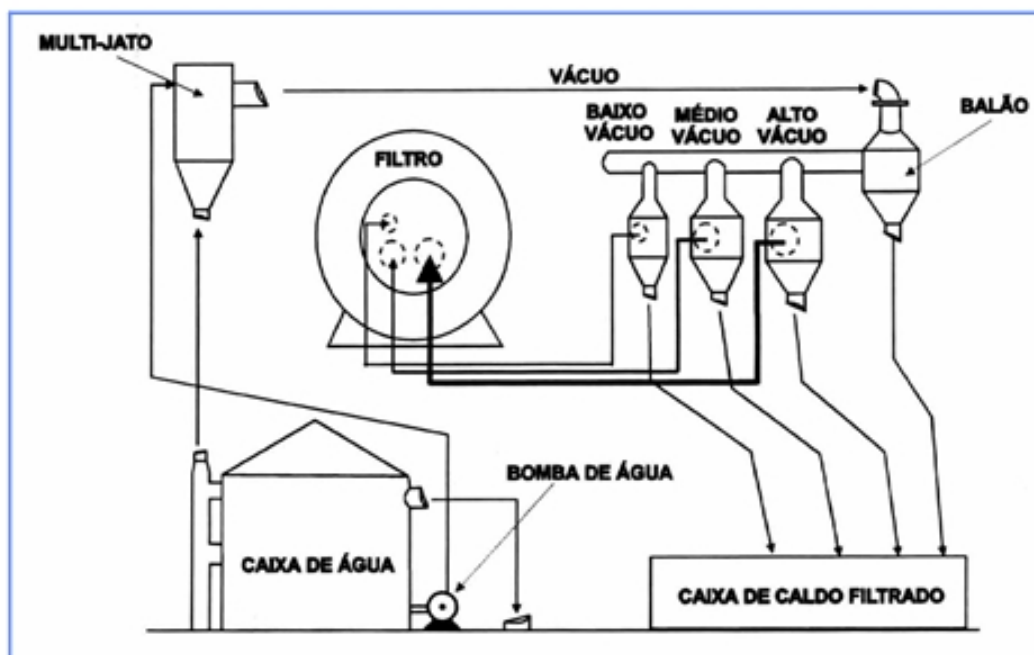


Figura 15.5.1 - Sistema de Vácuo

15.6 Prensa Desaguadora

Na figura a seguir é apresentado um tipo de filtro que vem substituindo com vantagens os filtros rotativos. Estes filtros já eram utilizados na indústria de papel e celulose.

Para lodos de decantadores na indústria do açúcar, permite a obtenção de um caldo, mais limpo. Apresenta maior extração de sacarose da torta devido à drenagem por sucção.

Apresenta maior capacidade de produção com uma umidade da torta entre 68 a 70%, equivalente à produção de dois filtros rotativos de 13'X52' (13 pés de diâmetro por 52 pés de comprimento).

Usa bagacilho na proporção de 1,5 a 3,0 kg/TC. O filtro VP apresenta caixas de vácuo: 1,5 a 2,0 polegadas de Hg nas três primeiras caixas e vácuo de 2,5 a 3,0 polegadas de Hg nas três últimas caixas. As telas filtrantes apresentam uma velocidade de 6 a 8 m/min. O VP possui água de embebição que lava a torta, possui alto e baixo vácuo e sistema de prensagem da torta, tal que a umidade da mesma no VP é da ordem de 68 a 70%, comparado com o rotativo que produz torta com 70 a 75% de umidade.

De maneira geral, pode-se afirmar que:

- Filtro Rotativo: menor consumo de polímero, maior área ocupada na fábrica, maior custo de instalação e maior quantidade de torta.
- Filtro Vacuum Press: melhor qualidade do caldo filtrado, facilidade operacional, pode operar sem bagacilho, maior capacidade, maior consumo de polímero, gera água de lavagem de tela com 0,5 brix (usada na embebição), gera um caldo filtrado mais diluído.

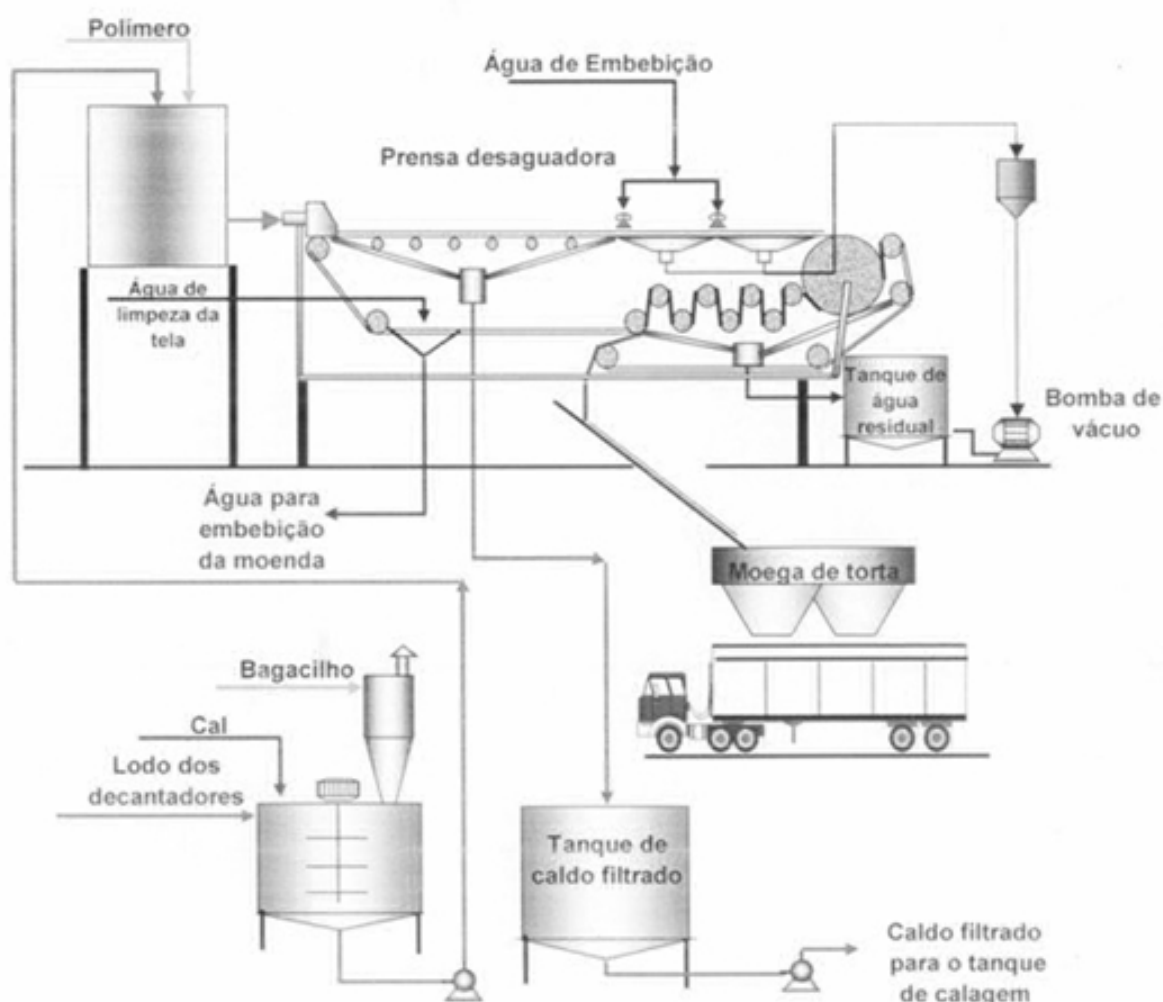


Figura 15.6.1 - Prensa Desaguadora

16. Concentração do Caldo

O objetivo da evaporação é concentrar o caldo clarificado, produzindo o xarope com uma 60 - 70° brix.

A concentração do caldo, por motivos técnicos e econômicos é realizada em duas etapas. A primeira em evaporadores de múltiplos efeitos aquecidos a vapor, produzindo xarope.

A segunda etapa realiza-se em evaporadores de simples efeito, aquecidos a vapor, denominados cozedores. Nestes o caldo entra na forma de xarope e sai na forma de massa cozida, na qual a sacarose apresenta-se parcialmente cristalizada.

16.1 Limite entre a Evaporação e o Cozimento

A evaporação é programada para que a concentração do xarope fique entre 60 e 70° brix, sendo recomendado 65° brix.

É possível obter a evaporação até 75° brix, porém os cozedores precisam de um xarope ainda capaz de dissolver cristais, para dissolver os falsos cristais formados durante o início do cozimento.

16.2 Evaporação do Caldo

A quantidade de água removida na evaporação é cerca de 80% em peso do caldo ou aproximadamente 70 - 80% do peso da cana.

O vapor que iria ser necessário para operar os evaporadores em simples efeito iria exceder o vapor gerado pela queima do bagaço. Assim usa-se evaporação em múltiplo efeito e se usa vapor de escape das turbinas no primeiro efeito da evaporação.

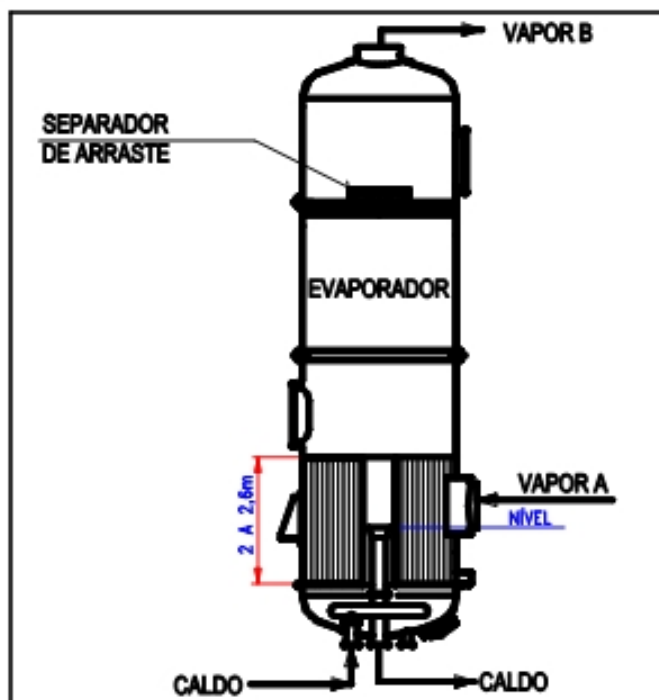


Figura 16.2.1 - Evaporador Tipo Roberts

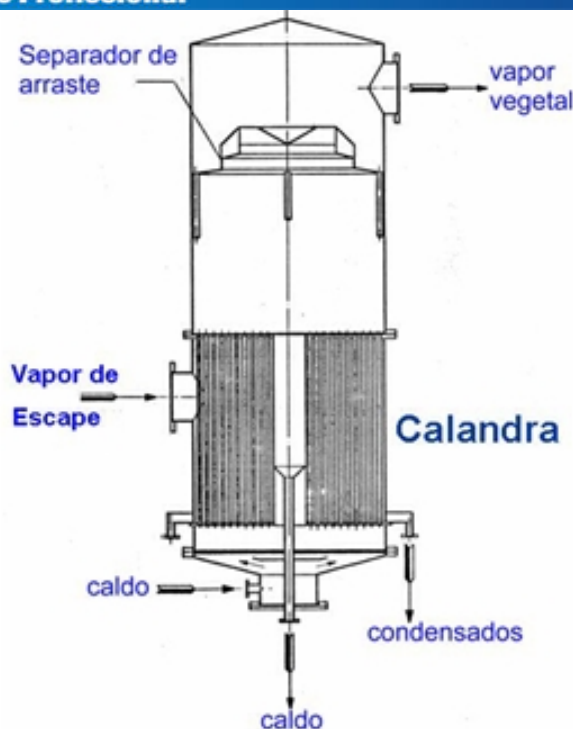


Figura 16.2.2 - Evaporador Tipo Roberts

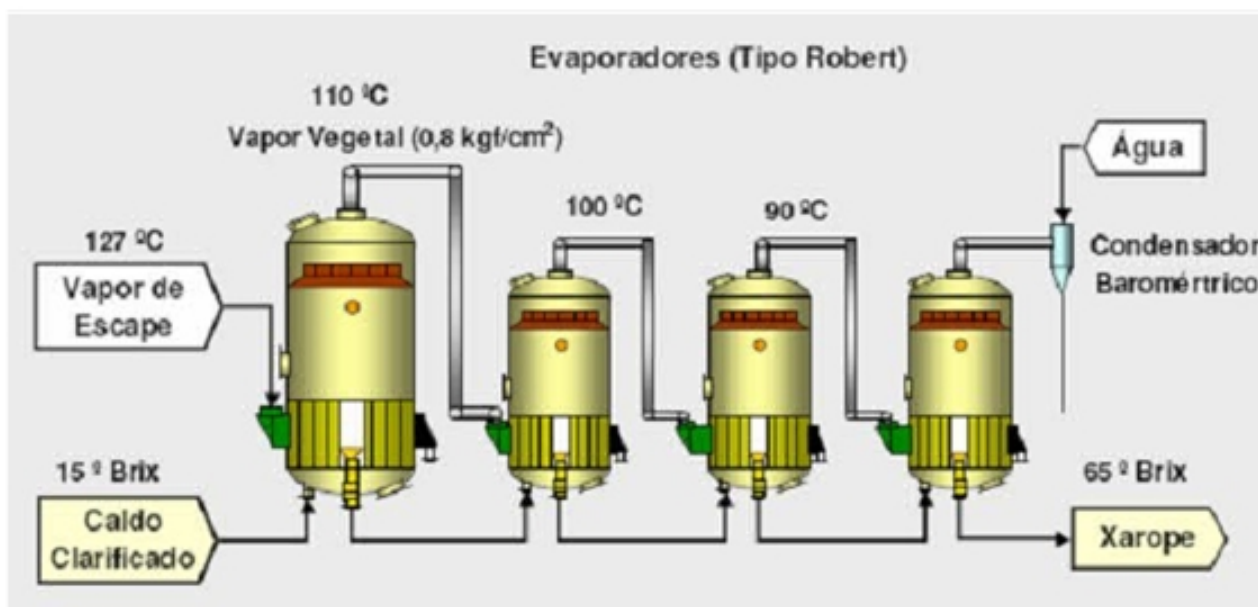


Figura 16.2.3 - Evaporador de Múltiplo Efeito (Tipo Roberts)

O 2º e demais evaporadores são aquecidos pelo vapor vegetal (vapor produzido pela evaporação de água do caldo) do efeito anterior.

O vapor de escape das turbinas entra no primeiro efeito, condensa, transfere calor para o caldo que se encontra dentro dos tubos, produzindo assim a evaporação da água (caldo) dentro dos tubos. Este vapor gerado (vapor vegetal) é utilizado no evaporador (efeito) seguinte. O evaporador múltiplo efeito é econômico ao usar vapor vegetal.

16.2.1 Tubos de Evaporadores Roberts

- Material de construção: aço carbono, latão ou aço inox □
- Comprimento: 1,60 a 4,5 m

- ☐ Diâmetro interno: 27 a 46 mm
- ☐ Espessura: 1,0 a 2,65 mm

Os tubos são mandrilados nos espelhos e desgastam-se principalmente nas extremidades, próximo aos espelhos. Para substituição de tubos, aqueles retirados dos primeiros evaporadores são utilizados nos posteriores, pois em geral estes são menores.

É importante adotar para a usina toda um diâmetro padrão para tubos e empregá-lo tanto nos aquecedores, como nos múltiplos efeitos. Quanto mais estreitos são os tubos, mais facilitam a subida do caldo, porque esta subida depende da proporção entre a superfície de aquecimento do tubo e sua seção interna.

16.3 Pressão nos Evaporadores

O múltiplo efeito trabalha com pressões decrescentes do primeiro para o último efeito. Assim, não são necessárias bombas para deslocar o xarope de um efeito para o seguinte. O evaporador múltiplo efeito foi descoberto por Rillieux na Louisiana em 1840.

16.3.1 Princípio de Rillieux

Em um múltiplo efeito, 1 kg de vapor de escape alimentado no primeiro efeito irá evaporar a mesma quantidade de água, quantos forem os efeitos, ou seja, 1 kg de vapor de escape produz 1 kg de vapor vegetal por efeito.

Na prática este princípio não é rigorosamente correto, sendo a evaporação um pouco menor que a prevista, devido:

- Calor necessário para elevar a temperatura do caldo até o ponto de ebulição no primeiro efeito;
- Perdas de calor por irradiação e remoção de gases incondensáveis;
- Aumento no calor latente do vapor à medida que a temperatura decresce.
- Decréscimo do calor específico do caldo à medida que este é concentrado;
- Reevaporação (flash) do caldo ao entrar num efeito de menor pressão;
- Reevaporação do condensado.

Os três primeiros efeitos contribuem para o decréscimo da evaporação total, enquanto os três últimos tendem a aumentá-la.

O caldo clarificado com uma concentração variando entre 13 e 15° brix inicia seu processo de concentração no 1º efeito ou no pré-aquecedor, que pode ser um evaporador convencional, um reboiler ou trocador de placas e tem como objetivo auxiliar na evaporação da água contida no caldo e gerar maior quantidade possível de vapor vegetal, resultando um caldo clarificado na primeira caixa de evaporação mais concentrado.

16.4 Transmissão de Calor em Tubo de Evaporação

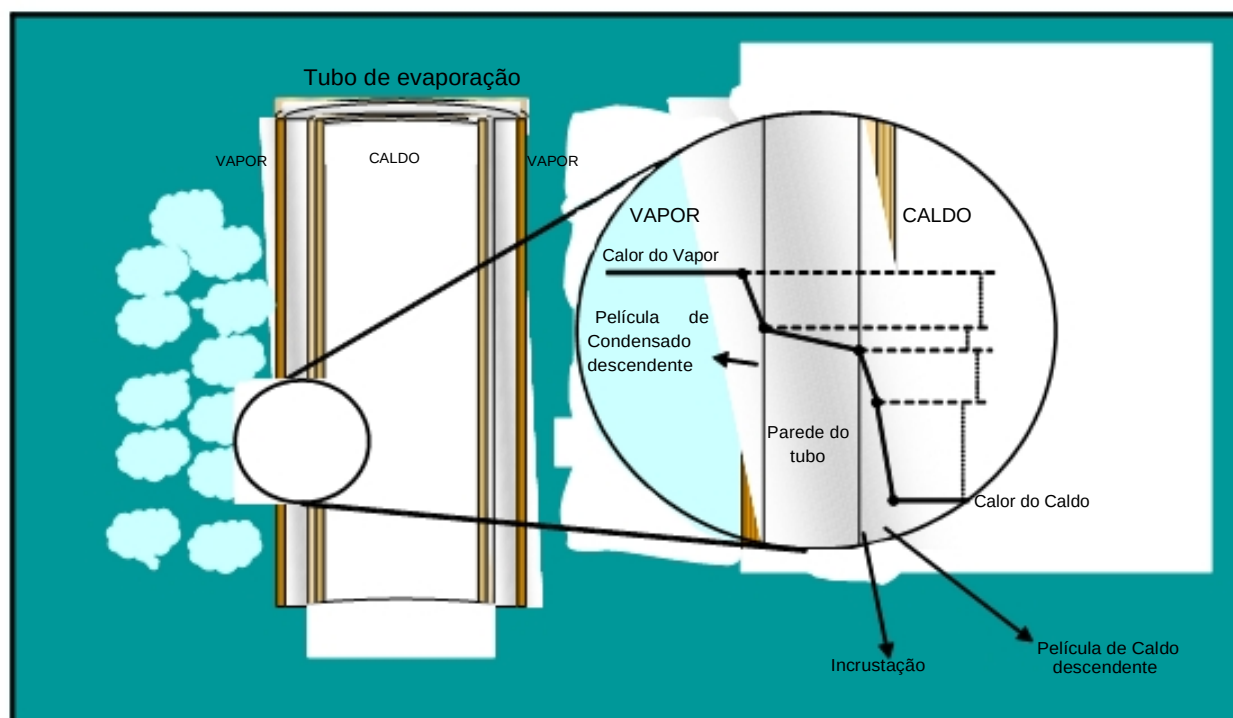


Figura 12.4.1 - Transmissão de Calor em Tubo de Evaporação

16.5 Pré-aquecedor com Reboiler

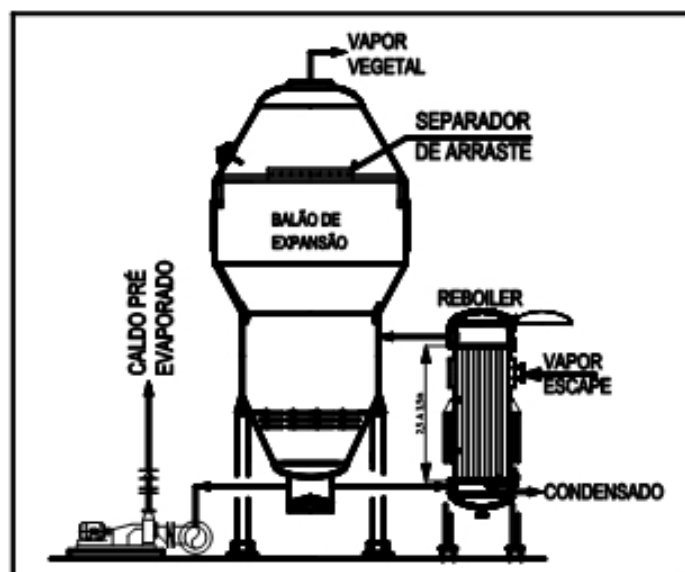


Figura 12.5.1 - Pré-aquecedor com Reboiler

16.6 Pré-aquecedor de Placas

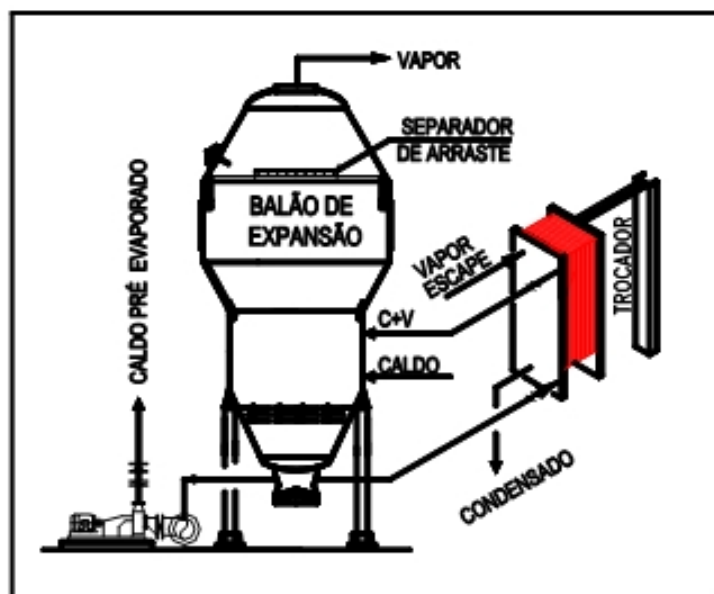


Figura 12.6.1 - Pré-aquecedor de Placas

16.7 Temperatura do Caldo Clarificado

A temperatura de alimentação do caldo clarificado tem uma relação direta com a superfície de aquecimento necessária neste primeiro efeito.

Normalmente a temperatura do caldo clarificado que entra no pré-evaporador é de aproximadamente 115°C (após pré-aquecimento).

Este caldo entrará em ebulição dentro deste equipamento. Se a temperatura de alimentação for inferior a 115°C, parte da superfície disponível no pré-evaporador será destinada, exclusivamente a aquecer o caldo até 115°C e posteriormente evaporar.

16.8 Limite Superior e Inferior da Temperatura na Evaporação

Temperatura crítica: o açúcar do caldo se carameliza, provocando perda de sacarose e uma coloração que subsiste até nos cristais de açúcar.

Para caldos de cana, alguns técnicos recomendam uma temperatura máxima do vapor (limite superior de temperatura) na calandra entre 127 e 130°C, o que corresponde a uma temperatura de cerca de 125°C no caldo.

O vapor de aquecimento entra na calandra do 1º efeito numa temperatura entre 125°C (1,3 kgf/cm²) a 130°C (1,7kgf/cm²).

O limite inferior da temperatura em que funciona um múltiplo-efeito é a temperatura de ebulição correspondente ao vácuo existente no último corpo. Um vácuo de 64 cm de Hg (25,2 in de Hg, 55°C) são os parâmetros indicados para o último efeito, mas existem algumas oscilações nestes valores. Assim a evaporação acontece numa faixa de temperatura de 125 a 55°C.

Na indústria açucareira os múltiplos efeitos são formados de 3, 4 ou 5 corpos, sendo denominados tríplexes, quádruplos ou quádruplos efeitos, respectivamente. Todos os evaporadores (corpos) são iguais em forma, constituição, capacidade, mas podem ter alturas dos tubos decrescente do primeiro ao último corpo.

16.9 Calandra

Situa-se no fundo do evaporador e é constituída de duas placas perfuradas, uma superior e uma inferior denominadas espelhos, os quais são interligados pelos tubos.

Existe na calandra um tubo central de diâmetro maior que os tubos periféricos. Desta maneira, durante a evaporação existem duas correntes de circulação de caldo, uma ascendente nos tubos periféricos e da periferia para o centro e uma segunda descendente pelo tubo central.

As águas condensadas depositam-se sobre o espelho inferior e devem ser retiradas da calandras.

A partir do 2º corpo há formação de gases incondensáveis, os quais se acumulam sob o espelho superior, formando zonas inativas, dificultando a transferência de calor do vapor em condensação para os tubos.

Tais gases devem ser removidos através de tubos, às vezes denominados tubos amoniacais. No próximo slide é apresentado um detalhe da eliminação destes gases.



Figura 16.9.1 - Evaporador

16.10 Retirada de Gases Incondensáveis

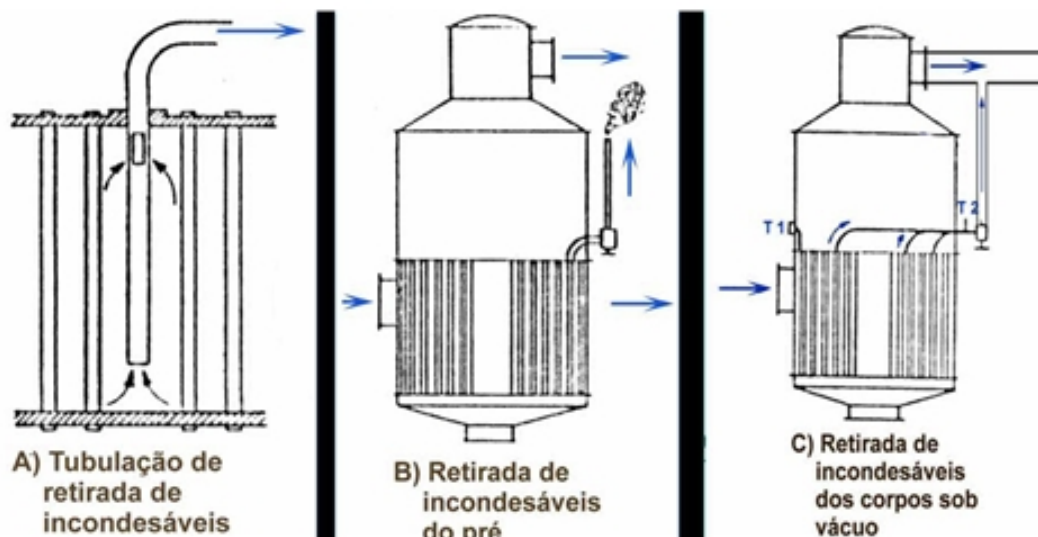


Figura 16.10.1 - Retirada de Gases Incondensáveis

16.11 Disposição dos Tubos nos Evaporadores

Os tubos são dispostos em quincôncio nos espelhos dos evaporadores. Esta disposição permite colocar um número maior de tubos por unidade de superfície dos

espelhos, com uma mesma distância entre os tubos. Os tubos são alinhados segundo três direções diferentes a 120° (ou os centros de três tubos vizinhos formam um triângulo equilátero). O vapor entra na calandra por uma, duas ou mais entradas:

- ☐ Altura de tubo < 3 m: uma entrada de vapor
- ☐ Altura de tubo > 3 m: duas entradas de vapor ☐

Altura de tubo >> 3 m: quatro entradas

Como exemplo de um quádruplo efeito sem pré-evaporador, tem-se: 1º

Efeito

Pressão na calandra: 1,63 kgf/cm²

Temperatura na calandra: 114°C

Pressão na câmara de gases: 1,24 kgf/cm²

Temperatura na câmara de gases: 106°C

Brix de entrada: 16

Brix de saída: 19,3

2º Efeito

Pressão na calandra: 1,24 kgf/cm²

Temperatura na calandra: 106°C

Vácuo na câmara de gases: 10,16 cm Hg

Temperatura na câmara de gases: 96°C

Brix de entrada: 19,3

Brix de saída: 25

3º Efeito

Vácuo na calandra: 10,16 cm Hg

Temperatura na calandra: 86°C

Vácuo na câmara de gases: 38,5 cm Hg

Temperatura na câmara de gases: 80,5°C

Brix de entrada: 25

Brix de saída: 36,5

4º Efeito

Vácuo na calandra: 38,5 cm Hg

Temperatura na calandra: 80,5°C

Vácuo na câmara de gases: 66 cm Hg

Temperatura na câmara de gases: 52°C

Brix de entrada: 36,5

Brix de saída: 60

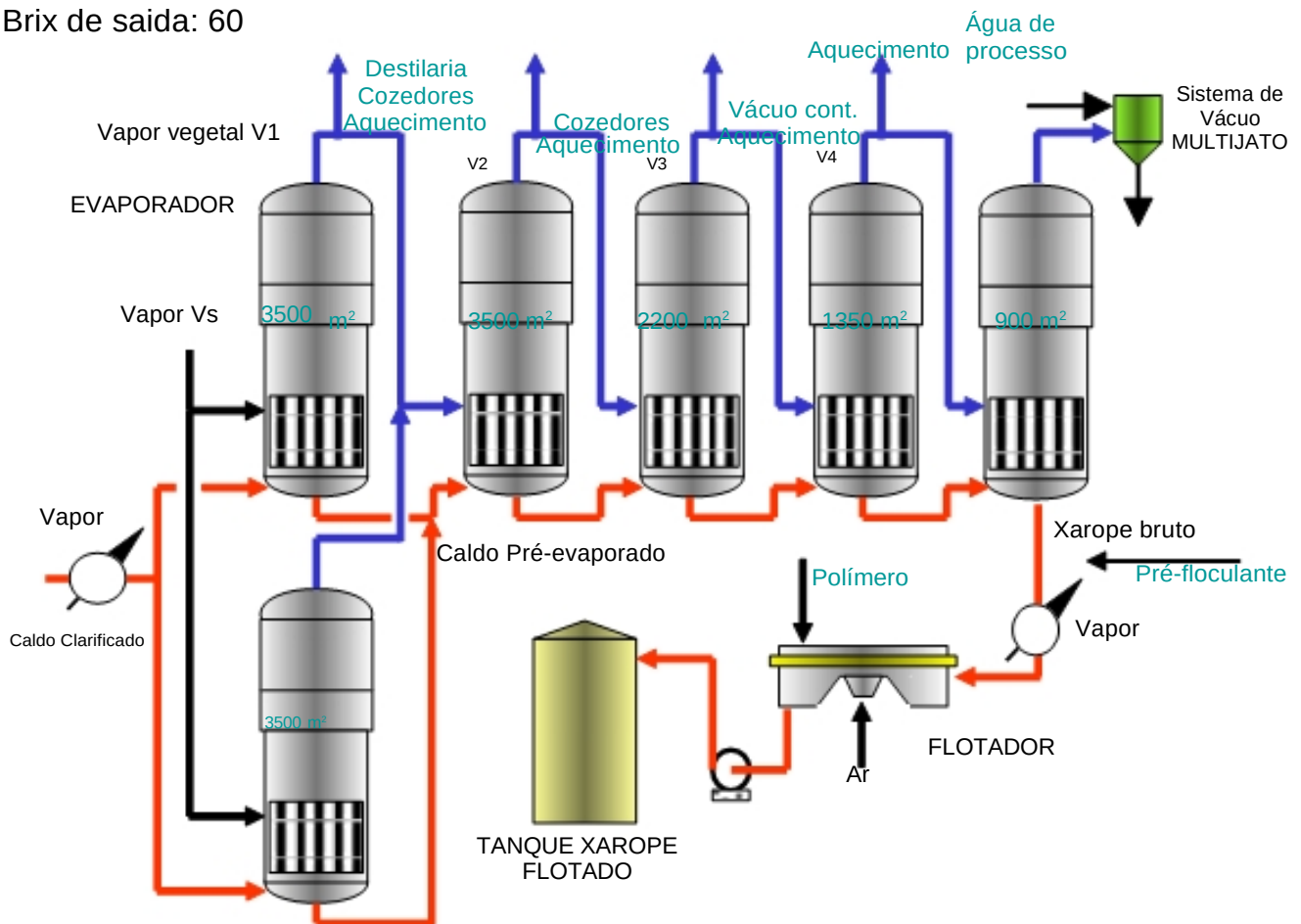


Figura 16.11.1 - Evaporadores

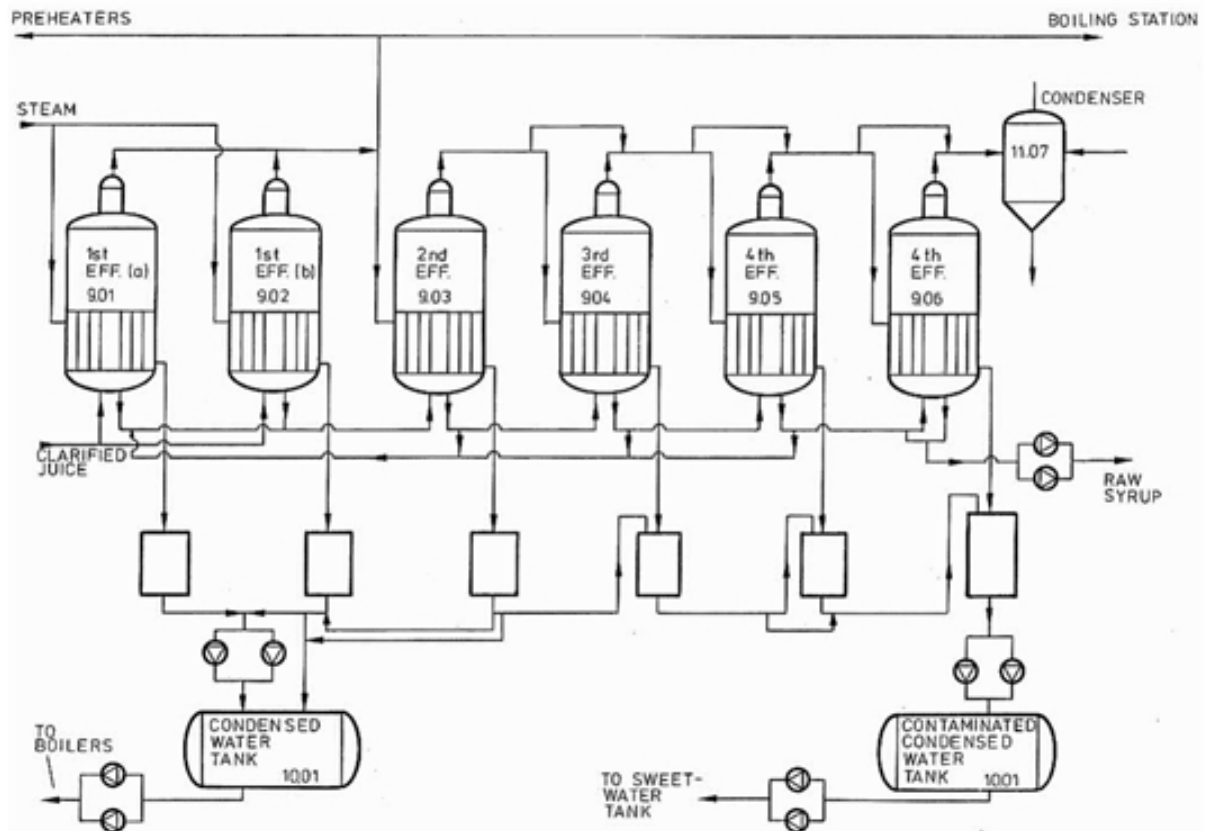


Figura 16.11.2 - Evaporação

16.12 Causas de uma Evaporação Deficiente

- Temperatura baixa caldo clarificado alimentando os pré - evaporadores (<105 °C)
- Tubos incrustados
- Tubos furados ou soltos
- Remoção de condensados deficiente
- Remoção de gases incondensáveis deficiente
- Tubos operando com nível incorreto de caldo
- Baixo vácuo no último efeito
- Baixa pressão do vapor de escape das turbinas
- Partidas e paradas freqüentes
- Variações na vazão de caldo
- Vazão de caldo acima do projetado (embebição elevada na moagem, moagem elevada)

16.13 Consequências de Falhas na Evaporação

- Redução na extração das moendas
- Redução na produção
- Perdas de álcool na vinhaça
- Geração de energia reduzida (Falta bagaço)
- Água desmineralizada insuficiente, devido à falta de condensado de escape.
- Filtro rotativo com perdas na torta devido volume baixo de água para embebição

16.14 Fatores que influenciam na Eficiência dos Pré - Evaporadores

16.14.1 Incrustações

A formação de incrustações nos evaporadores, aquelas pertinentes à parte interna dos tubos, se deve, principalmente a uma crescente redução de água no caldo em concentração, redução esta que permite aos não-açúcares atingirem, com mais intensidade, nos últimos vasos, a condição de supersaturação e precipitarem. Entretanto não só o efeito da concentração, mas também o efeito da temperatura pode provocar precipitações de alguns sais.

Concorrem para a formação de maior ou menor quantidade de incrustações nos evaporadores, que varia de região para região. E depende das seguintes condições:

a) Composição do Caldo

- ☐ Variedade de cana
- ☐ Tipo der solo cultivado
- ☐ Sistema de colheita de cana
- ☐ Estado de limpeza da cana (terra)
- ☐ Sistema de lavagem de cana
- ☐ Grau de extração pela moenda

- b) Peneiramento do Caldo
- c) Qualidade da Cal, Má hidratação da Cal
- d) Qualidade do Enxofre e dos Aditivos da Clarificação
- e) Processos de Clarificação: sulfitos formam 30% das incrustações
- f) Nível de Caldo nas Calandras dos Evaporadores
- g) Velocidade de Circulação de Caldo nos Diversos Vasos;
- h) Condição de Vácuo nos Evaporadores
- i) Sistema Operacional e Qualidade de Mão-de-Obra utilizada na Evaporação
- j) Pressão e Temperatura do Vapor de Alimentação

A incrustação pode ser acelerada se houver:

- Oscilação na vazão do caldo;
- Descontrole da correção do pH na dosagem.

16.14.2 Incrustação devido à Operação

A presença de uma maior formação de incrustação em determinadas regiões da calandra, é um dos sintomas característicos de má circulação do caldo.

É muito importante que o nível do caldo seja mantido em aproximadamente um terço da altura dos tubos, para proporcionar uma boa circulação do caldo.

Com relação à limpeza, deve-se registrar que se a tubulação de uma evaporação não estiver bem limpa, mais rapidamente a incrustação se formará;

Já se estiver bem limpa, com a superfície dos tubos lisa, mais dificilmente ocorrerão depósitos de sujeira.

16.14.3 Métodos de Limpeza

- a) Limpeza mecânica: Efetuada com rasquete ou roseta rotativa.
- b) Limpeza com Jato de Água sob Alta Pressão
- c) Limpeza Química CIP (Clean In Place)
 - ☐ Encher os tubos com solução 2 a 3% de NaOH, ferver por várias horas e lavar em seguida com água;
 - ☐ Eventualmente pode-se após o tratamento com soda, lavar com solução 2% HCl.

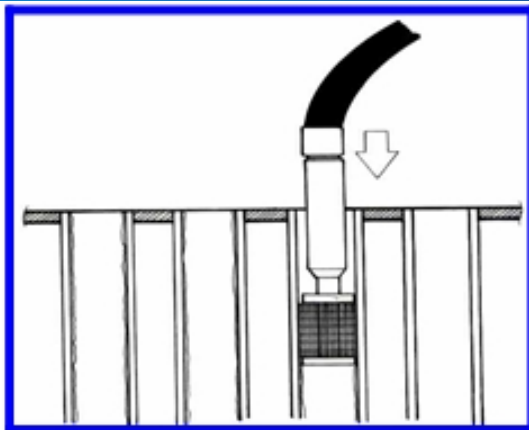


Figura 16.14.3 - Rosqueta Rotativa

16.14.4 Nível do Caldo

Em todos os corpos deve-se manter aproximadamente $\frac{1}{3}$ da altura dos tubos, tendo como objetivo reduzir o efeito da pressão hidrostática no ponto de ebulição do caldo, aumentando assim a circulação do caldo e conseqüentemente obter uma máxima taxa de evaporação.

a) Nível do Caldo muito Baixo: O caldo tende a ferver e não consegue chegar à parte superior dos tubos, concentrando.

b) Nível do Caldo demasiadamente Alto: Os tubos ficam submersos e a evaporação é prejudicada. Proporciona maior arraste e perda de açúcar, e contaminação do condensado para as caldeiras.

c) Recomendações

- ☐ Instalar medidor de nível em todas as caixas de evaporação.
- ☐ O funil coletor de caldo situado no interior do tubo central deve ser posicionado a $\frac{1}{3}$ da altura dos tubos.
- ☐ Um outro meio pratico é observar através das lunetas, de tal forma o caldo se mantenha jorrando dos tubos sobre toda a superfície do espelho, molhando-o sem submergi-lo.
- ☐ Sistema de retirada de condensado com sifão ou sistema automático.

16.14.5 Retirada de Gases Incondensáveis

Em qualquer equipamento que se utiliza vapor como fonte de calor, após a sua condensação é necessária uma continua retirada de incondensáveis, pois eles ocupam espaço e impedem a entrada de vapor naquela região, reduzindo significamente o processo de transferência de calor.

16.14.6 Origem da Formação de Gases

- Ar trazido pelo vapor de escape geralmente pouco.
- Gases dissolvidos no caldo, liberados pela ebulição nos vapores vegetais.

16.14.7 Concentração de Gases

A quantidade desses gases é muito mais freqüente em corpos aquecidos com vapor vegetal e principalmente nos corpos sob vácuo.

17. Extração do Xarope

A operação de um múltiplo efeito deve ser contínua, desde a alimentação do caldo clarificado, passagem entre as caixas até a retirada do xarope, vazão de favor, retirado de condensados e incondensados, até a vazão de água do sistema de vácuo.

A retirada é efetuada no último corpo de evaporação, por sifão, e direcionado para os tanques.

Alguns cuidados quanto à extração são:

- Brix acima de 72% pode iniciar o processo de cristalização
- Brix baixo aumenta o consumo de vapor e tempo de cozimento
- Deve-se checar a bomba regularmente para evitar vazamento de xarope, evitando perdas, pois o produto está concentrado.
- Manter o vácuo da última caixa acima de 24 pol Hg (61 cm Hg), pois influência diretamente na evaporação.

17.1 Efeitos dos Gases

Se estes gases não forem retirados continuamente eles irão se acumular e num caso extremo, tomam toda calandra interrompendo rapidamente a evaporação.

Além de problemas relacionados com a diminuição da transferência de calor, normalmente estes são os principais causadores de corrosão.

17.2 Extração dos Gases

- É efetuada por diferença de pressão.
- Nos corpos sob vácuo, aos tubos vindos da calandra se unem em um coletor. Normalmente irá condensar no último efeito.
- A regulação da retirada desses gases pode ser feita por válvulas ou placas de orifício dimensionadas.

17.3 Separadores de Arraste

a) Objetivo: Eliminar arraste de caldo nas caixas de evaporação e cozimento.

Durante a evaporação, a ebulição lança ao ambiente-vapor do corpo, finas gotículas de caldo. Estas gotículas, na forma de bolhas, são muito leve e a corrente de vapor as

leva facilmente para a calandra do corpo seguinte, ou em direção ao condensador barométrico.

Quanto maior for o vácuo maior é a incidência de arraste (perdas de açúcar) e, portanto, são mais críticos no último corpo.

b) Como diminuir o Arraste

- Evitar que o vácuo chegue a um valor exagerado (24 - 26 cm de Hg);
- Instalar a chegada do caldo no fundo do corpo do evaporador e não por cima do espelho;
- Evitar operar o múltiplo efeito além de sua capacidade normal, lembrando que o corpo acima da calandra não serve ao caldo;
- Evitar deixar subir o nível do caldo muito acima do nível ótimo;
- Munir a tubulação de vácuo dum separador de arraste eficiente;
- O corpo do evaporador acima do espelho superior da calandra deve ser no mínimo 2 vezes a altura da calandra.

Perdas de Açúcar: 20 ppm no vapor e 0,5 ppm na água.

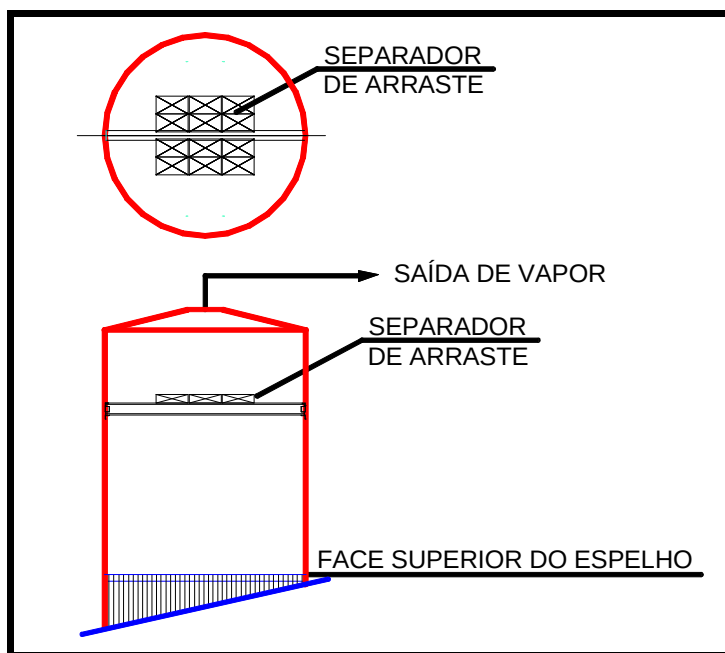


Figura 17.3.1 - Separador de Arraste



Figura 17.3.2 - Separador de Arraste

17.4 Diagrama de Instalação

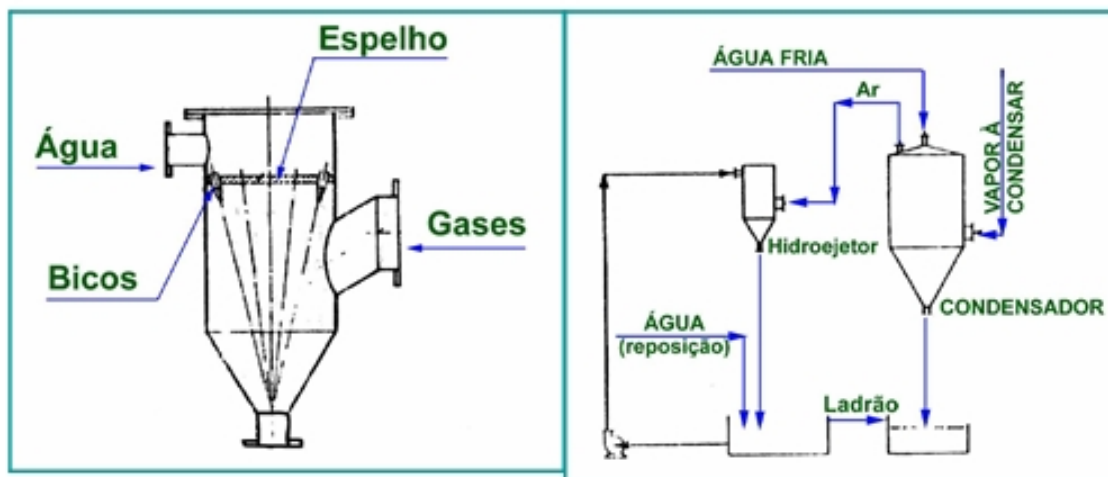


Figura 17.4.1 - Diagrama

17.5 Evaporador Falling Film

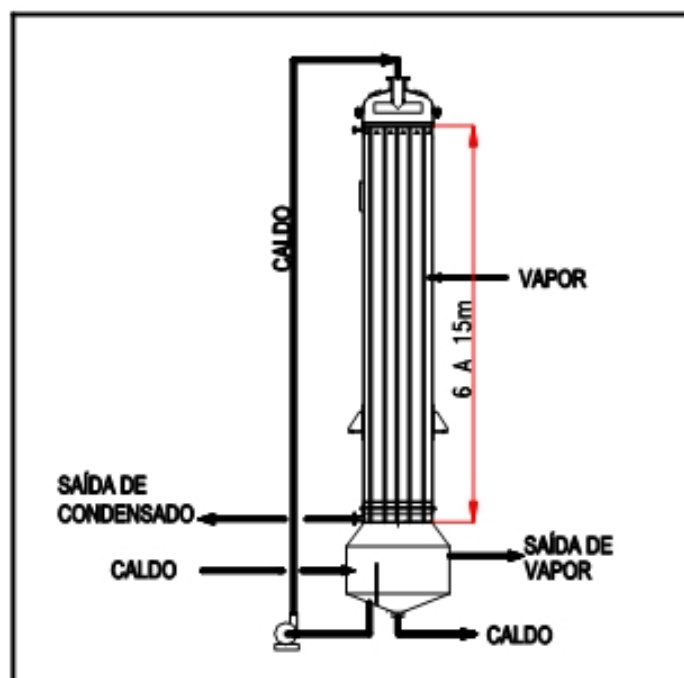


Figura 17.5.1 - Evaporador Falling Film

17.6 Isolamento

A evaporação é o coração térmico da fábrica quando se trata do consumo de energia em processo, perdas de calor por radiação, quando os evaporadores não estão propriamente isolados, podem chegar a 5 - 10%, além do desconforto operacional.

17.7 Comparações entre Evaporadores

Tabela 17.7.1 - Comparações entre Evaporadores

Tipo de Evaporador	Vantagens	Desvantagens
Roberts (Convectivo)	Taxa mais constante	Instalação alta e onerosa.
	Recirculação natural.	Reserva para limpeza cara.
	Baixa potência.	Ampliação cara.
		Campanha de 7 dias.
		Elevação da temperatura de ebulição.
	Vantagens	Desvantagens
Falling Film (Tubo Longo: 8 a 12 m)	Taxa alta (limpo).	Taxa variável operando com produtos de incrustação inorgânica.
	Limpeza química.	Eventual limpeza mecânica.
	Campanhas mais longas (15 dias).	Problema com distribuidor de caldo dos tubos.
	Compacto e auto-portante.	Ampliação cara.
	Tempo de residência menor.	Recirculação forçada com alta potência
	Sem elevação de temp. de ebulição.	
	Vantagens	Desvantagens
Multi - Reb (Convectivo)	Taxa mais constante	Campanha de 7 dias.
	Recirculação natural.	Elevação da temperatura de ebulição
	Baixa potência.	
	Limpeza mecânica com alta segurança operacional.	
	Sistema modular de baixo custo.	
	Reserva para limpeza de baixo custo.	
	Vantagens	Desvantagens
Placa (Convectivo)	Taxa alta (limpo).	Taxa variável (40/25).
	Limpeza química.	Não permite limpeza mecânica.
	Facilidade de ampliação.	Ampliação barata.
	Vantagens	Desvantagens
Falling Film (Placa)	Taxa alta.	Não permite limpeza mecânica.
	Limpeza química.	Ampliação cara.
	Campanha mais longa.	Taxa variável (70/30).

18. Extração de Águas Condensadas

O calor transmitido do vapor ao caldo, através da calandra, corresponde ao calor latente de vaporização do vapor. Todo o vapor de aquecimento se transforma em água condensada na calandra. É necessário retirar da calandra uma massa de água igual à massa de vapor utilizado.

Esta retirada de água efetua-se por meio de drenos colocados na parte inferior da calandra, por várias maneiras, conforme a pressão na calandra:

- ☐ Calandra sob pressão: purgador.
- ☐ Calandra sob vácuo: caixa de sifão (Marais)
- ☐ Calandra sob pressão ou sob vácuo: bomba, sifão, tanque flash.

18.1 Resfriamento de Águas Condensadas



Figura 18.1.1 - Resfriamento de Águas Condensadas

19. Transformações Físico-químicas no Caldo durante a Evaporação

19.1 Formação da Cor

- ☐ É maior no primeiro corpo onde a temperatura é mais alta.
- ☐ É também causada por deficiente circulação do caldo na calandra e altos tempos de retenção.
- ☐ Quando o vácuo é baixo, a temperatura de sistema sofre uma elevação, aumentando a formação de cor.

19.2 Diminuição do pH

- Durante a evaporação é comum um decréscimo no pH de valores próximos a 0,3 e não deve ultrapassar uma queda de 0,5. Como exemplo, cita-se: pH do caldo clarificado 6,9 e do xarope 6,5.

- As perdas de açúcar por inversão na evaporação não deveriam ultrapassar 0,2%, sendo acompanhadas pelo teor de glicose no caldo.
- Este decréscimo é proporcional ao tempo de retenção na evaporação.

19.3 Pureza do Xarope

- Ocorre um pequeno aumento devido à mudança na rotação específica dos componentes não-açúcares.
- Quando há uma queda nesta pureza, é uma indicação de inversão de sacarose, causando perdas indesejáveis.
- Perdas por inversão, tanto mais elevadas quanto mais altas forem a temperatura e a acidez. Acima de 100°C, a inversão aumenta muito e fica proibitiva acima de 125-130°C.

20. Flotador de Xarope

Tem como objetivo a remoção das substâncias que dão cor ao açúcar, bem como dos materiais insolúveis em suspensão (que aparecem como “insolúveis” no produto final) e das macromoléculas (dextrana) responsáveis pelo aumento da viscosidade do xarope e conseqüentes problemas nas etapas seguintes de fabricação. Os equipamentos que compõem um flotador de xarope são:

- Caixa cilíndrica de aço carbono geralmente com pintura em epóxi.
- Raspadores em sua superfície, também uma caixa com saída de xarope.
- Aquecedores de xarope, que são do tipo tubular e estão dispostos na horizontal, ou aquecedores diretos.

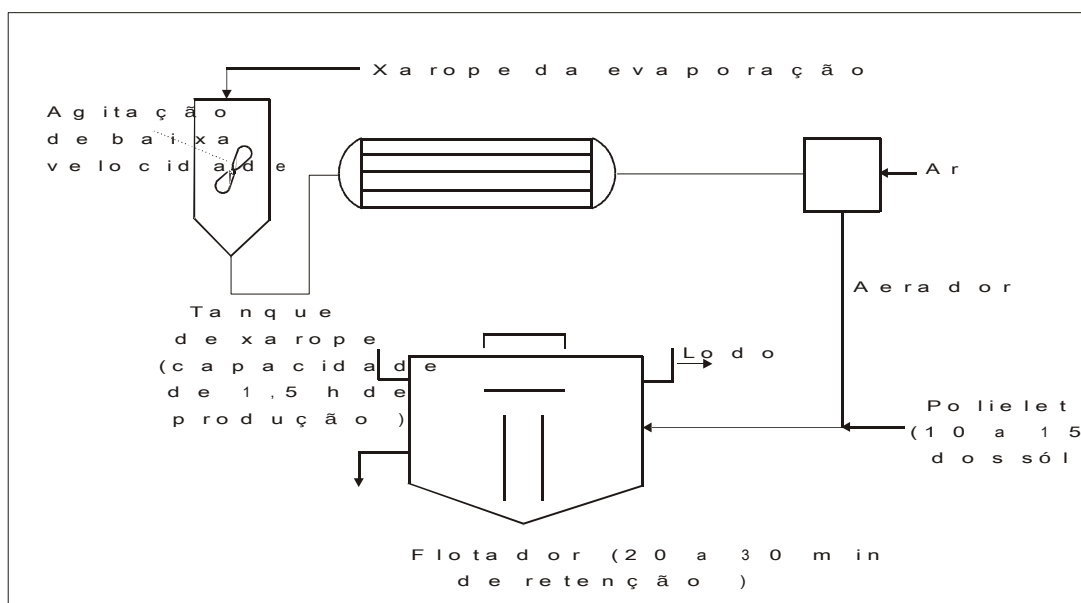


Figura 20.1 - Flotação do Xarope



Figura 20.2 - Flotador do Xarope



Figura 20.3 - Xarope

20.1 Purificação por Flotação

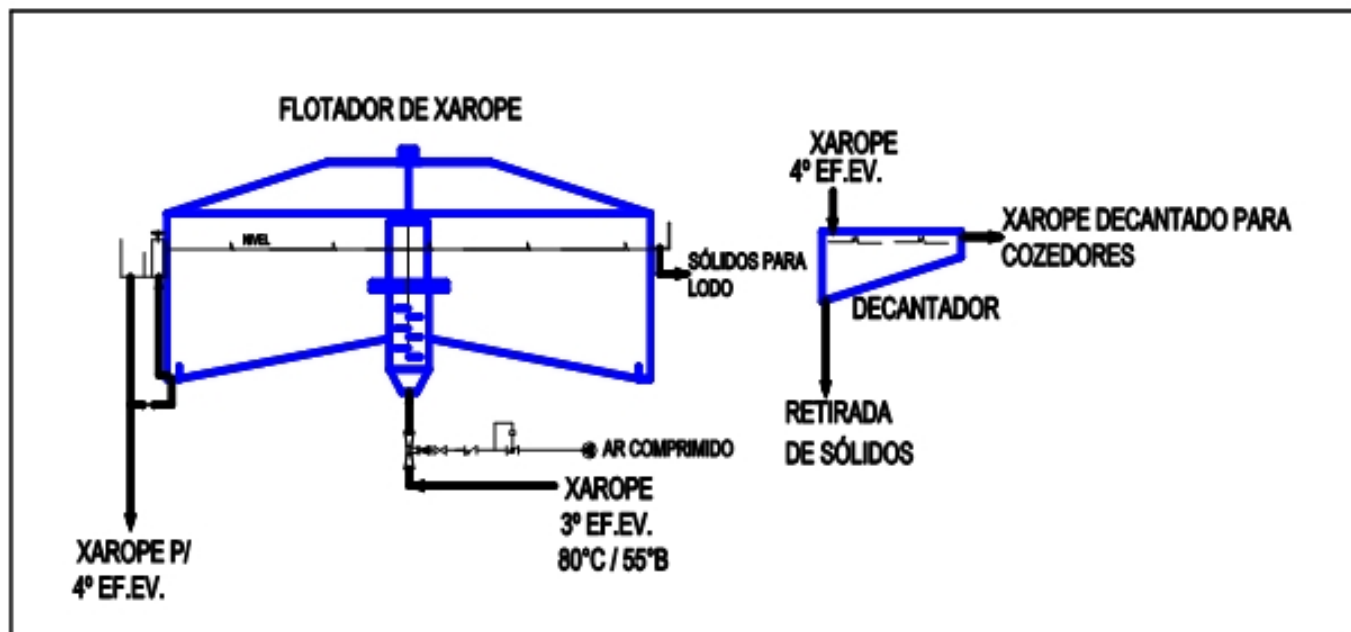


Figura 20.1 - Purificação por Flotação

20.2 Conceitos Gerais

A flotação é um processo de separação sólido-líquido e líquido-líquido onde os materiais em suspensão são recuperados através de sua adesão às bolhas de um gás (geralmente ar), tornando os mais leves que no meio.

20.3 Descrição Geral

- O controle da operação do flotador é efetuado de forma a se obter um lodo flotado o mais concentrado o possível.
- A concentração e espessura da camada do lodo flotado é regulada pelo ajuste do nível de operação do flotador.
- O xarope clarificado é retirado por gravidade do flotador para o tanque.
- O lodo flotado é removido por meio de raspadores de superfície e recolhido na calha de lodo, onde seguirá para caixa de caldo misto.

20.4 Fosfatação

Utiliza-se ácido fosfórico para promover a microfloculação das impurezas do xarope, e sua dosagem vai depender da qualidade do xarope.

20.5 Aquecimento

O xarope deve ser aquecido, próximo de 85°C, e o objetivo é de acelerar as reações de microfloculação e reduzir a viscosidade do meio.

20.6 Macrofloculação

A adição de polímero flocculante é feita entre os aeradores e o flotador, possibilitando uma rápida dispersão do produto no xarope.