

**UNIVERSIDADE DO SAGRADO CORAÇÃO**

**CLAUDINEI APARECIDO AFONSO**

**INFLUÊNCIA DA CRISTALIZAÇÃO E COZIMENTO  
DO AÇÚCAR NO RENDIMENTO E QUALIDADE DO  
PRODUTO ACABADO**

BAURU  
2012

**CLAUDINEI APARECIDO AFONSO**

**INFLUÊNCIA DA CRISTALIZAÇÃO E COZIMENTO  
DO AÇÚCAR NO RENDIMENTO E QUALIDADE DO  
PRODUTO ACABADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Ciências Exatas e Sociais Aplicadas como parte dos requisitos para obtenção do título Bacharel em Engenharia Química, sob a orientação do Prof. Ms. André Luis Antunes de Almeida.

BAURU  
2012

A2579i

Afonso, Claudinei Aparecido

Influência da cristalização e cozimento do açúcar no rendimento e qualidade do produto acabado / Claudinei Aparecido Afonso -- 2012.

54f. : il.

Orientador: Prof. Me. André Luiz Antunes de Almeida.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade do Sagrado Coração - Bauru - SP

1. Açúcar cristal branco. 2. Cristalização. 3. Pureza. 4. Semente. I. Almeida, André Luiz Antunes de. II. Título.

**CLAUDINEI APARECIDO AFONSO**

**INFLUÊNCIA DA CRISTALIZAÇÃO E COZIMENTO DO AÇÚCAR  
NO RENDIMENTO E QUALIDADE DO PRODUTO ACABADO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Ciências Exatas e Sociais Aplicadas da Universidade do Sagrado Coração como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química sob a orientação do Prof. Ms. André Luis Antunes de Almeida.

Banca Examinadora:

---

Prof. Ms. André Luis Antunes de Almeida  
Universidade do Sagrado Coração

---

Prof. Dr. Sandro Megale Pizzo  
Universidade do Sagrado Coração

---

Prof. Dr. Raúl Andres Martinez Uribe  
Universidade do Sagrado Coração

Bauru, 13 de Dezembro de 2012.

Dedico este trabalho,  
a DEUS que me abençoou e me deu essa  
oportunidade, força e coragem em toda esta  
jornada,  
a minha esposa Ana Paula e minha filha Maria  
Eduarda que sempre acreditaram em mim.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus, pela oportunidade de poder trilhar o caminho acadêmico e por proporcionar-me essa tão grande sorte nessa minha etapa acadêmica e por tudo que ele tem me feito.

Agradeço a minha esposa Ana Paula e a minha filha Maria Eduarda, por suportarem junto comigo os momentos mais difíceis e pelo apoio e pela confiança que me passaram e por sempre acreditarem em mim e que esse dia iria chegar me transmitindo ânimo e força.

Agradeço a meus pais, pela educação, disciplina e ensinamentos a mim passados, que é a base na minha formação com ser humano e que contribuiu grandemente para minha formação acadêmica.

Agradeço a todos os meus professores, que ao longo dessa jornada contribuíram para a minha formação acadêmica, pois sem eles seria impossível obter o conhecimento que hoje tenho, e agradeço também a paciência que tiveram comigo todos esses anos, pois sem essa seria improvável o meu sucesso. Sempre me lembrarei deles com muita gratidão.

Agradeço em especial ao meu professor orientador Ms. André Luis Antunes de Almeida, pela sua paciência, atenção, compromisso e dedicação, pois foram essas virtudes fatores determinantes no desenvolvimento e conclusão desse trabalho.

Agradeço a todos os meus amigos do curso, que ao longo da minha jornada foram leais e companheiros nas horas boas e ruins, compartilhando e me ajudando em minhas dificuldades, em especial agradeço aos meus amigos Marlon, Valdemir e Eder pelo apoio em toda minha jornada acadêmica, que também foram grandes companheiros desde o início.

“Feliz aquele que transfere o que  
sabe e aprende o que ensina”  
(Cora Coralina)

## RESUMO

No processo de obtenção do açúcar cristal branco, a partir da cana-de-açúcar, são necessárias diversas etapas, dentre elas a de cristalização do açúcar. A cristalização do açúcar tem um papel muito importante na quantidade e na qualidade do produto final. Nas usinas brasileiras são adotados alguns diferentes métodos de cristalização, de acordo com a concepção da sua planta industrial, porém o mais utilizado é o que ocorre com a adição de semente para semeadura. Tal técnica consiste no preparo de uma semente de qualidade buscando a padronização da uniformidade dos cristais. O objetivo desse trabalho é descrever os principais métodos de cristalização e cozimento do açúcar, bem como mostrar as vantagens e desvantagens, condições operacionais, equipamentos e mensuração dos resultados da comparação de cristalização de açúcar em alta e baixa pureza, demonstrando assim quais são os benefícios e inconvenientes destes métodos, levando em conta a eficiência, a produtividade e a qualidade do produto final.

**Palavras-chave:** Açúcar Cristal Branco. Cristalização. Pureza. Semente.

## **ABSTRACT**

In the process of obtaining the white crystal sugar from the sugar cane, several steps are needed, among them the crystallization of sugar. The crystallization of the sugar has an important role in the quantity and quality of the final product. In some Brazilian mills are adopted different methods of crystallization, according to the design of its plant, but the most used is what occurs with the addition of seed for sowing. This technique consists in preparing a seed quality seeking standardization of uniform crystals. The aim of this paper is to describe the main methods of crystallization of sugar and cooking, as well as showing the advantages and disadvantages, operating conditions, equipment and measuring the results of the comparison of sugar crystallization in high and low purity, thus demonstrating what are the benefits and drawbacks of such methods, taking into account the efficiency, productivity and end product quality.

**Keywords:** White Crystal Sugar. Crystallization. Purity. Seed.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Pré-evaporação e Evaporação.....	19
Figura 2 - Evaporador de múltiplo efeito .....	20
Figura 3 - Sistema de injeção de ar .....	22
Figura 4 - Fluxograma flotor de xarope .....	22
Figura 5 - Fluxograma sistema de cozimento de duas massas .....	24
Figura 6 - Curva de Supersturação X Sacarose .....	28
Figura 7 - Curva de Supersaturação X Pureza.....	29
Figura 8 - Cozedor batelada, vertical com calandra fixa e plana.....	32
Figura 9 - Semente preparada para cristalização.....	34
Figura 10 - Açúcar comercial de boa qualidade.....	37
Figura 11 - Açúcar comercial com elevado teor de conglomerados.....	38
Figura 12 - Açúcar comercial com elevado teor de geminados.....	39
Figura 13 - Massa cozida de má qualidade com presença de cristais falsos.....	40
Figura 14 - Açúcar comercial de excelente qualidade.....	40
Figura 15 - Método de esgotamento de duas massas.....	43
Figura 16 - Fases das centrifugas intermitentes.....	46
Figura 17 - Secador rotativo de açúcar.....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Temperatura e Saturação .....	26
Tabela 2 – Temperatura e gramas de açúcar dissolvido.....	26

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>15</b>
2.1 GERAL.....	15
2.2 ESPECÍFICOS .....	15
<b>3 DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS DE PRODUÇÃO DO AÇÚCAR CRISTAL.....</b>	<b>16</b>
3.1 CALDO DE CANA .....	16
3.1.1 OBTENÇÃO DO CALDO .....	17
3.2 TRATAMENTO DO CALDO .....	17
3.3 EVAPORAÇÃO DO CALDO.....	18
<b>4 FLOTAÇÃO DO XAROPE.....</b>	<b>21</b>
4.1 PROCESSO DE FLOTAÇÃO.....	21
<b>5 CRISTALIZAÇÃO E COZIMENTO DO AÇÚCAR.....</b>	<b>24</b>
5.1 EXAURIMENTO DOS COZIMENTOS E CIRCULAÇÃO DE NÃO-AÇÚCARES.....	25
5.2 SUPERSATURAÇÃO .....	25
5.2.1 TEMPERATURA .....	25
5.3 SOLUBILIDADE .....	26
5.4 SATURAÇÃO .....	27
5.5 COEFICIENTE DE SUPERSATURAÇÃO .....	27
5.6 ZONAS DE SUPERSATURAÇÃO .....	27
<b>6 CRISTALIZAÇÃO .....</b>	<b>30</b>
6.1 EFICIÊNCIA DA CRISTALIZAÇÃO .....	32
6.2 TAXA DA CRISTALIZAÇÃO .....	33
6.3 PREPARO DA SEMENTE .....	33
<b>7 QUÍMICA DO PROCESSO DE CRISTALIZAÇÃO .....</b>	<b>35</b>
<b>8 PUREZA DO MATERIAL A CRISTALIZAR .....</b>	<b>36</b>
8.1 CRISTALIZAÇÃO EM MEIO DE BAIXA E ALTA PUREZA.....	36
<b>9 UNIFORMIDADES DOS CRISTAIS .....</b>	<b>37</b>
9.1 CRISTAIS IRREGULARES .....	37
9.2 CONGLOMERADOS.....	38
9.3 CRISTAIS GEMINADOS .....	38
9.4 CRISTAIS FALSOS .....	39
<b>10 CONCENTRAÇÃO FINAL DE MASSA PARA DESCARGA .....</b>	<b>41</b>

<b>11 ESGOTAMENTO – RECUPERAÇÃO MÁXIMA DA SACAROSE.....</b>	<b>42</b>
<b>12 CENTRIFUGAÇÃO DO AÇÚCAR.....</b>	<b>45</b>
<b>13 SECAGEM DO AÇÚCAR.....</b>	<b>47</b>
<b>14 CONCLUSÃO.....</b>	<b>49</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>51</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Há mais de 500 anos, o açúcar se apresentava no mercado com alto valor agregado em toda a Europa, seu preço era comparado ao do ouro, em virtude da baixa produção da época que não era capaz de atender as necessidades do mercado. Logo os investimentos em plantios da cana-de-açúcar tornaram-se negócios muitos rentáveis, mas por conta das condições climáticas era impossível de ser realizado na Europa, daí a necessidade de procurar novo território para o cultivo dessa cultura.

Nos séculos XV e XVI, com o avanço na tecnologia naval, os portugueses desbravaram os oceanos a procura de territórios que propiciassem condições climáticas favoráveis a cultivo da cana-de-açúcar. (ÚNICA, 2011).

Em 1493 Cristovão Colombo que era genro de um grande produtor de açúcar na Ilha de Madeira, foi quem introduziu o plantio da cana nas Américas. (ÚNICA, 2011).

Exemplos do plantio e cultivo da cana-de-açúcar, pelos portugueses são as lavouras nas ilhas de Cabo Verde, Açores e Madeira. Em 1530 após a expedição de Martim Afonso de Souza, deu-se início ao cultivo de cana-de-açúcar no Brasil. A cana-de-açúcar foi plantada no massapé, sob clima tropical e úmido, fazendo o uso de mão de obra escrava trazida da África. Começava aí o primeiro ciclo econômico brasileiro, que recebeu o nome de o “Ciclo da Cana-de-Açúcar”. Com o enriquecimento de Portugal e com o aumento do comércio do açúcar, os franceses, espanhóis e ingleses se estimularam a produção de açúcar na América Central. No Brasil, a capitania com maior produção de açúcar era inicialmente a de Pernambuco, de Duarte Coelho, onde foi criado o primeiro centro açucareiro do País. Depois estendendo-se o plantio para a Bahia de Todos os Santos, São Tomé (Rio de Janeiro) e São Vicente (São Paulo), sendo essas duas as últimas regiões a lucrar com a produção de açúcar. Em 1532, foi instalado o Engenho dos Erasmos, do Governador Geral Martim Afonso de Souza (ÚNICA, 2011).

Na época as fábricas de açúcar eram chamadas de engenhos. Para a produção de açúcar era necessário moer a cana em um sistema muito rústico, em que o esmagamento era realizado em grandes cilindros onde a força para movimenta-los era gerada por rodas d'água ou parrelhas de boi. Todo o caldo extraído nesse processo era levado para a casa das fornalhas, para ser concentrado em tachos constituídos de material de cobre e em seguida transferidos para as formas, nas quais ocorria o processo de cristalização. A massa que se obtia desse

processo passava pelo processo de purificação na casa de purga era dividida em pães de açúcar, pois essa era forma que se comercializava no Brasil. Para exportar o produto aos países compradores havia necessidade de triturar e secar os pães de açúcar ao sol para transporta-los em caixas.

O Brasil já havia se apresentado como o maior produtor mundial de açúcar no século XIX, ficando com 8% da produção mundial. Com o fim do Ciclo do Café, aconteceu uma retomada no cultivo da cana para produção de açúcar para o mercado interno. (ÚNICA, 2011).

O Brasil é hoje líder mundial na produção de cana-de-açúcar. O setor emprega hoje mais de 4 milhões de colaboradores. E respondeu por 1,76% do PIB (Produto Interno Bruto) em 2008. Sendo o responsável por mais da metade do açúcar comercializado no mundo, o Brasil busca alcançar taxa média de produção de 3,25%, até 2018/19, e com estimativa de colher 47,34 milhões de toneladas do produto, atingindo um acréscimo de 14,6 milhões de toneladas se comparados ao período de 2007/08. Para exportações, tem-se uma previsão de 32,6 milhões de toneladas para 2019. (BRASIL, 2011).

Atualmente a cana de açúcar ocupa um grande território totalizando cerca de 7 milhões de hectares ou cerca de 2% de toda terra cultivável do país. As regiões de cultivo predominam no Sudeste, Centro-Oeste, Sul e Nordeste, permitem até duas safras por ano, possibilitando a produção de açúcar durante o ano todo atendendo as necessidades para os mercados internos e externos. (ÚNICA, 2011).

No passado os processos de produção de açúcar não requeriam apurados controles de qualidade, ou seja, fazer açúcar não era tão difícil. Mas não tão simples é produzir açúcar buscando atingir bons resultados em todas as etapas subsequentes com boa recuperação, uniformidades dos cristais, evitando deficiências nas etapas seguintes, evitando perdas e comprometimento da qualidade do produto final. (ALBUQUERQUE, 2010).

Para a produção de açúcar de qualidade, parte-se do principio de que a usina possa processar durante sua operação matéria-prima de qualidade, ou seja, que a cana que está em processo tenha sido cortada recentemente e que apresente baixo teor de açúcares invertidos no caldo primário e no mínimo 84 de pureza no xarope bruto.

É exigida ainda, a necessária a redução das quantidades de impurezas no interior dos cristais e a redução da quantidade de mel na parte externa dos cristais. Com esta finalidade podem-se usar técnicas de cozimento direcionadas para o desenvolvimento de cristais

perfeitos que atendam a qualidade granulométrica dos cozimentos e boa uniformidades. (ALBUQUERQUE, 2010).

O objetivo desse trabalho é mostrar o processo de produção de açúcar, seus principais equipamentos em cada etapa, destacando o processo de cozimento de açúcar com ênfase nas técnicas de cristalização da sacarose. Uma função fundamental na fabricação de açúcar é a separação da sacarose das impurezas associadas às soluções sacarinas, e assim com a separação dos cristais através do uso da força centrífuga, visto que outras impurezas já foram eliminadas nos processos anteriores de clarificação do caldo e do xarope. Os não-açúcares presentes nos méis exercem influência negativa no processo de cristalização, e a separação da sacarose dos não-açúcares por cristalização exige repetidas cristalizações, permitindo a produção de diversas qualidades de massas, até um ponto economicamente viável. (ALBUQUERQUE, 2010).

## 2 OBJETIVOS

Este trabalho de conclusão de curso teve como diretrizes norteadoras os seguintes objetivos:

### 2.1 GERAL

- Verificar a influência das técnicas de cristalização e cozimento de açúcar na qualidade e na quantidade de produção de açúcar.

### 2.2 ESPECÍFICOS

- Descrever sucintamente as técnicas de cristalização de açúcar.
- Comparar as técnicas de cristalização com baixa pureza e alta pureza.

### **3 DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS DE PRODUÇÃO DO AÇÚCAR CRISTAL**

Processos e equipamento eficientes contribuem para aumento na produção de açúcar, mas é importante salientar que no processo não se produz sacarose, mas apenas recupera a existente no caldo e transforma-se em açúcar. (CAVALCANTE; ALBUQUERQUE, 2010).

Atualmente os processos de obtenção e fabricação de açúcar, utilizando como matéria-prima a cana-de-açúcar, em geral nas usinas é evidenciado o grande avanço no segmento sucroalcooleiro no Brasil, podendo diferenciar-se de uma usina para outra em função das tecnologias empregadas e concepção dos equipamentos, porém as sequencias das etapas envolvidas no processo são as mesmas.

#### **3.1 CALDO DE CANA**

Para se atingir alta eficiência no processo de produção de açúcar, é necessário que se extraia da cana um caldo de boa qualidade, pois é o principal fator que influenciará na qualidade das etapas seguintes e na qualidade do açúcar no final do processo, uma matéria prima de boa qualidade facilita o tratamento e recuperação da sacarose nela contida.

A avaliação da qualidade tecnológica do caldo de cana se dá pela sua composição, e depende de vários outros fatores que devem ser considerados desde a escolha da variedade para o plantio, característica do solo, fatores genéticos e ambientais dos tratamentos culturais, estado de maturação, sistema de colheita, processo de extração entre outros, são fatores que afetam diretamente a qualidade do caldo obtido e o rendimento da produção.

A qualidade da cana-de-açúcar não se limita e não pode simplesmente ser avaliada pelo teor de sacarose, a qualidade da matéria-prima é o principal fator que influencia diretamente na maximização da rentabilidade da empresa, sabendo-se que sua participação no custo final do produto, chega a ordem de 65 a 70%. Quando se apresenta com boa qualidade a matéria-prima o processamento se torna mais fácil e rápido e trás resultados de alto rendimento industrial, e com isso reduz os custos por unidade de produto. Já quando se emprega matéria-prima de má qualidade, aumentam-se as perdas no processo, aumenta o consumo de utilidades e insumos tais como produtos químicos, causando menor rendimento e produto de qualidade inferior. (ALBUQUERQUE, 2010).

### 3.1.1 OBTENÇÃO DO CALDO

A cana-de-açúcar chega a usina transportada por caminhões, que ao sair e chegarem a usina passam por pesagem em balanças tipo rodoviária para se determinar a quantidade de cana que será processada e em seguida passam pelas sondas mecânicas tipo brocas que fazem a amostragem da carga e enviada a laboratório de PCTS (Pagamento da Cana por Teor de Sacarose), para determinar o teor de sacarose contida na cana. Daí então segue-se para os hilos, onde a cana é descarregada em mesas alimentadoras que controlam o fluxo de cana para as moendas. A moenda é constituída de 5 a 7 ternos sendo cada um compostos por 4 rolos, que tem a função de prensagem da cana para extração do caldo.

Durante o processamento da cana após o primeiro terno da moenda a cana sofre o processo de embebição sendo umedecida com água, que facilita e propicia melhor rendimento na extração do caldo diminuindo perdas na fibra da cana, é também em virtude da embebição que nas usinas preferencialmente o caldo obtido no 1º e 2º terno, o que chamamos de caldo primário para a produção de açúcar. É necessário realizar o tratamento e concentrar o caldo para seja possível a cristalização para formação dos cristais, portanto quanto mais água se utiliza nas etapas anteriores, maior será o consumo de energia para fazer a concentração do mesmo. (HUGOT, 1977).

### 3.2 TRATAMENTO DO CALDO

O tratamento do caldo inicia-se nos equipamentos de descarga, transporte, condução e preparo da cana, e durante toda a seção de moagem para extração do caldo, sendo esses os pontos com maiores índices de contaminação. Durante todo o processamento do caldo, os equipamentos envolvidos devem receber cuidados especiais quanto a limpezas, pois eles têm contato direto com toda a matéria-prima e recebe diversos tipos de preparo e evitando assim a exposição da sacarose com microrganismos, através de uma assepsia contínua e eficaz. (CAVALCANTE; ALBUQUERQUE, 2010).

O tratamento do caldo misto é determinado de acordo com a qualidade de açúcar que se pretendo produzir, para a produção de açúcar cristal branco o caldo passa pelas etapas que envolverão ações físicas (aquecimento, flasheamento, peneiramento), e etapa que envolve reações químicas (reações providas pela adição de produtos químicos), com o intuito de

obter a máxima eliminação de não-açúcares, coloides, mínima formação de cor, máxima taxa de sedimentação, mínimo volume de lodo, mínimo volume de cálcio no caldo que propicia a formação de incrustações em equipamento das etapas seguintes e controle do pH adequado (6,8 a 7,2), evitando a inversão da sacarose ou a decomposição dos açúcares redutores, provendo uma boa clarificação do caldo, com boas condições para recuperação do açúcar. (CAVALCANTE; ALBUQUERQUE, 2010).

### 3.3 EVAPORAÇÃO DO CALDO

Após passar pelo processo de clarificação seguido da etapa de peneiramento, o caldo clarificado passa por mais uma etapa de aquecimento composta por uma bateria de trocadores de calor, conhecida como 3º aquecimento que tem por finalidade atingir uma temperatura que varia entre 115°C a 118°C, para aumentar a eficiência dos pré-evaporadores, uma vez que essa temperatura melhora a taxa de evaporação, e contribui para a redução do tempo de retenção do caldo no interior do pré-evaporador evitando a ocorrência de formação de cor no caldo. A pré-evaporação é a etapa que antecede a evaporação do caldo, nos pré-evaporadores é utilizado vapor de escape provindo das turbinas das moendas com pressão de 2,5 bar<sub>abs</sub>, ou seja, 1,5 kgf/cm<sup>2</sup> e temperatura de 127°C, o vapor gerado da evaporação da água contida no caldo dos pré-evaporadores será utilizado nas caixas de evaporação.

A evaporação é considerada uma etapa do processo de grande importância para o processo de cozimento de açúcar, sendo ela que determina boa parte das operações em função da concentração do xarope bruto. Sendo essa seção a responsável por realizar a primeira etapa de recuperação de açúcar presente no caldo. A finalidade desse processo consiste em elevar a concentração do caldo que inicialmente se encontra em uma faixa de 20° a 24°Brix para uma faixa ideal de 65°Brix, requerendo assim a evaporação de aproximadamente 75% da água contida no caldo. (CAVALCANTE; ALBUQUERQUE, 2010).

Sendo uma fábrica de açúcar uma exímia consumidora de vapor, a necessidade de economia de vapor obriga o uso de evaporadores de múltiplos efeitos além do uso de sangrias de vapores para uso nos aquecedores e trocadores de calor, distribuídos de forma ordenada dentro do processo de fabricação, sendo que a cada efeito ocorre a queda de temperatura e de pressão do vapor, fazendo necessária a utilização de um sistema eficiente de vácuo no último efeito. Normalmente os projetos e instalações adequadas utiliza o quádruplo ou quádruplo efeito, com as capacidades dimensionadas de acordo com o volume de água que se pretende

evaporar, de caldo disponível para processamento e a quantidade de açúcar que se pretende produzir. Os pré-evaporadores e evaporadores também fornecem água condensada proveniente da troca térmica de cada efeito, que poderão ser utilizadas para alimentar os balões das caldeiras, lavagem do açúcar nas centrifugas, em trocadores de calor e reposição em qualquer etapa do processo. (PAYNE, 2010).

Sistema de evaporação de múltiplos efeitos permitiu trabalhar com temperaturas menos prejudiciais e reaproveitamento dos vapores gerados por cada caixa, contribuindo para melhor qualidade do produto final evitando o aumento da cor e inversão da sacarose, considerando que a temperatura crítica para o caldo de cana é de 120°C, a partir da qual o açúcar do caldo se carameliza causando ganho de coloração indesejada e aumento da taxa de inversão, conforme figura 1 e 2. (HUGOT, 1977).

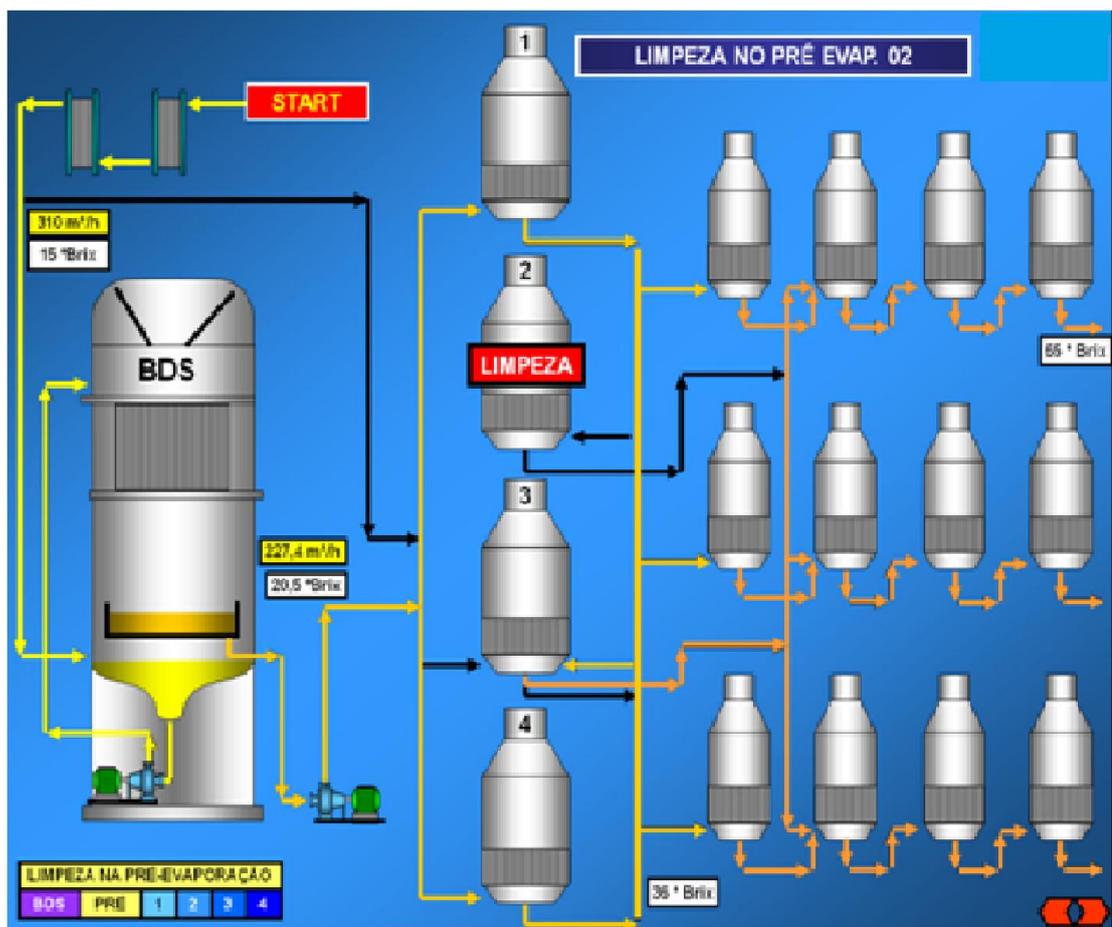


Figura 1 – Pré-evaporação e Evaporação.  
Fonte: Gangorra (2007).

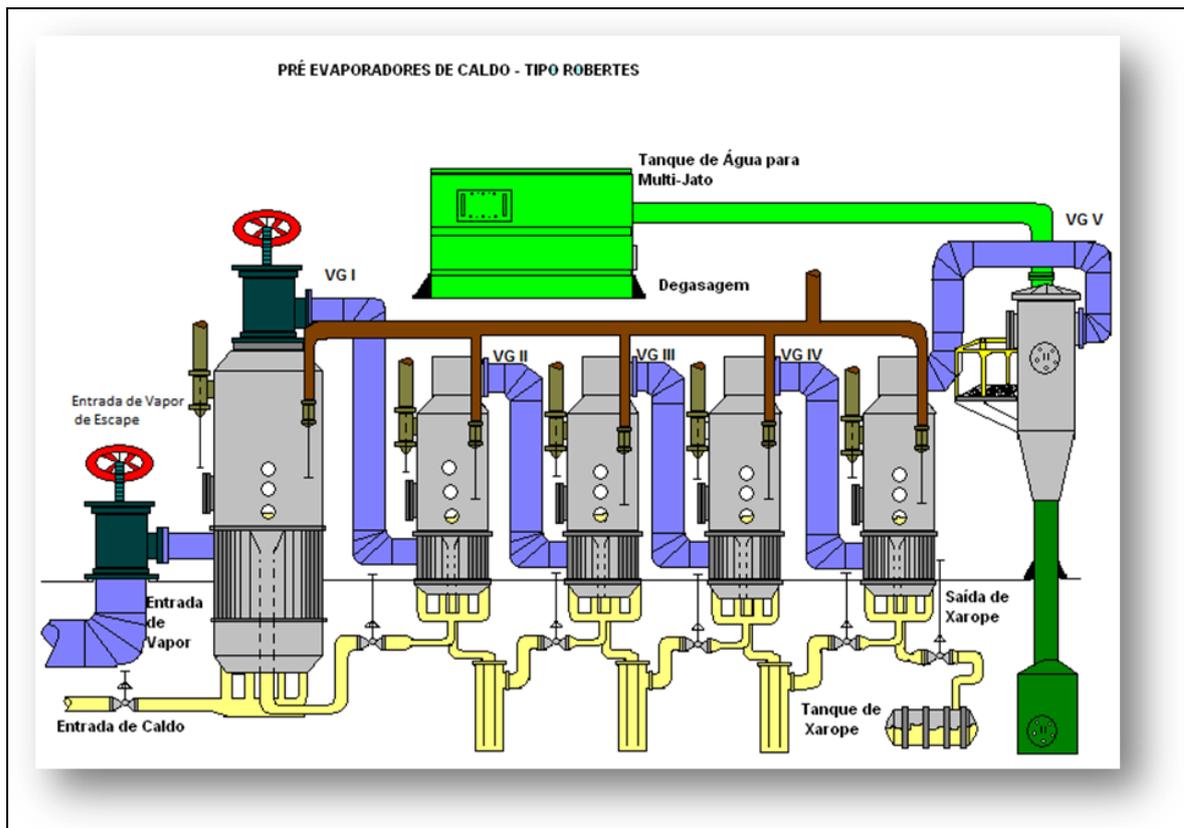


Figura 2 – Evaporador de Múltiplos Efeitos.  
Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4 FLOTAÇÃO DO XAROPE

O açúcar cristal destinado ao consumo humano, deve ser um produto isento de substancias insolúveis (bagacilho, resíduo de incrustações, ferrugens, etc.) o xarope obtido da evaporação é conhecido como xarope bruto, por não ter passado ainda por nenhuma etapa de tratamento para retirada desses insolúveis. A flotação é um processo para retirada de impurezas contidas no xarope, por isso é considerada uma segunda etapa de clarificação, esse processo serve para remover insolúveis, que durante a concentração do caldo na evaporação foram insolubilizadas, novas substancias que ficam em suspensão no xarope.

A clarificação do xarope tem por objetivo remover todas as substancias que dão cor ao açúcar, bem como materiais insolúveis, substancias coloidais aniônicas, essas são consideradas as principais causadoras de cor, gomas, dextranas, polissacarídeos e outras impurezas que produzem viscosidade no xarope. (ALBUQUERQUE, 2010).

### 4.1 PROCESSO DE FLOTAÇÃO

É um processo de separação físico-químico, envolvendo importantes etapas distintas que são realizadas atendendo uma sequencia específica.

De forma geral, a flotação envolve as seguintes etapas:

- Em geral o xarope bruto obtido do processo de evaporação normalmente deve ser processado com brix na faixa de 65 a 70%.
- Adição de produtos químicos, descolorante (sulfactante catiônico) e ácido fosfórico, para remover as principais impurezas formadoras de cor e turbidez.
- Aquecer o xarope a temperatura entre 80-90°C, auxilia na reação dos produtos dosados e redução da viscosidade (capacidade do sólido passar pelo líquido).
- Aplicação de polieletrólito (polímero floculante).
- Aeração é feita a adição de micro bolhas de ar que irão unir as partículas a serem separadas do meio, tornando-as menos densas que o líquido e, portanto, propensas a flotação.
- Macrofloculação ocorre quando as micro bolhas arrastam por aprisionamento formando flocos de tamanho maior e propensa a flotação.

- Separação de fases consiste na retirada das partículas da superfície que se forma pela flotação por meio de raspador mecânico. (ALBUQUERQUE, 2010).

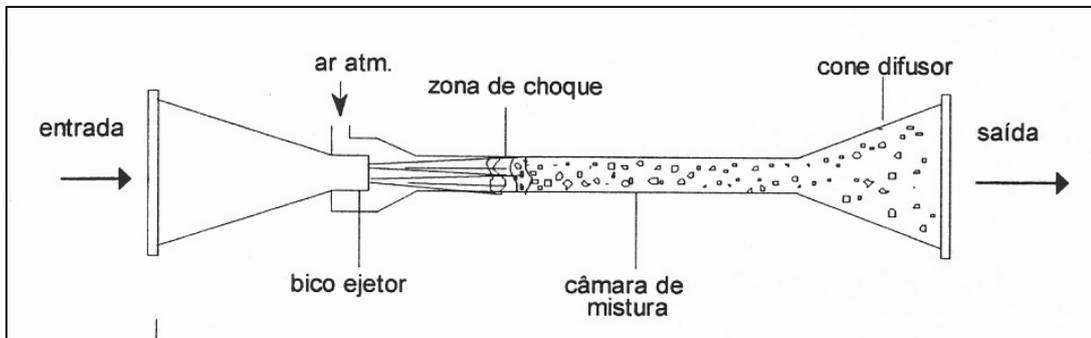


Figura 3 – Sistema de injeção de ar.

Fonte: Engenho Novo Tecnologia Ltda. (2002. p. 11).

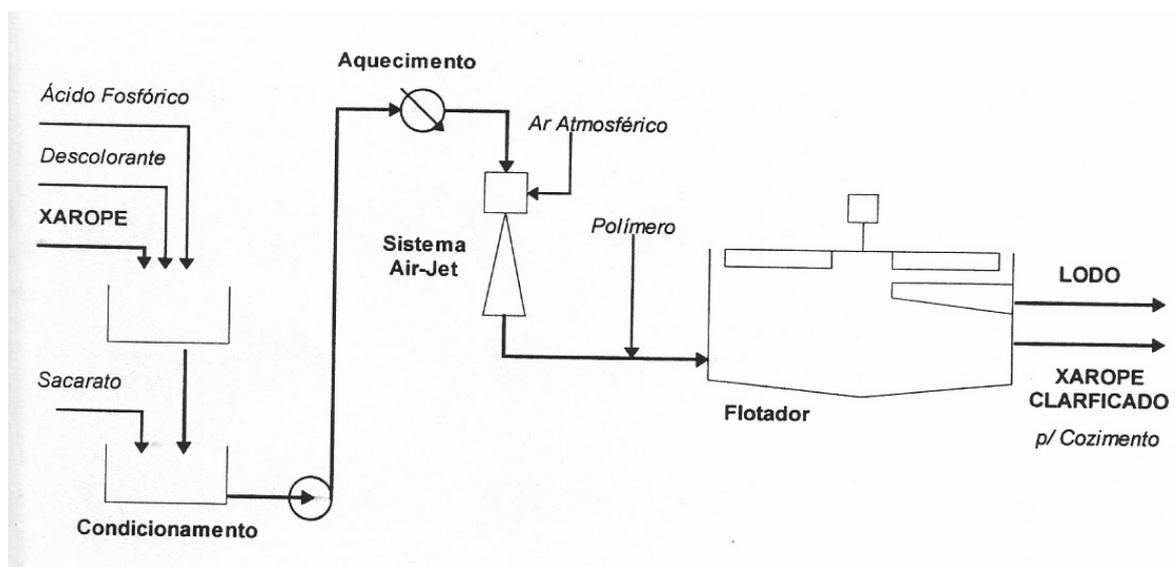


Figura 4 – Fluxograma flotação de xarope.

Fonte: Engenho Novo Tecnologia Ltda. (2002. p. 11).

No processo de flotação ocorre a adsorção de sais solúveis e consegue-se um xarope flotado com uma taxa na redução de 10% a 20% na cor, e 60% a 70% na turbidez e baixa também a viscosidade. O xarope flotado com baixa viscosidade e claro garante massas cozidas com boa qualidade e proporciona aumento de uniformidade dos cristais, além de aumentarem a capacidade dos tachos, redução da circulação de méis e melhora os níveis de produção e qualidade do açúcar a produzir.

Com a utilização de sistemas de flotação de xarope torna se possível a produção de açúcar de qualidade favorecendo a redução da dosagem de SO<sub>2</sub> no caldo de maneira

significativa, sendo que dosagens altas de enxofre causam danos à saúde dos consumidores, corrosão nos equipamentos e pode causar amarelecimento do açúcar durante o período de armazenamento. (ALBUQUERQUE, 2010).

## 5 CRISTALIZAÇÃO E COZIMENTO DO AÇÚCAR

O objetivo da cristalização é duplo. O primeiro é a transformação do açúcar em solução para o estado cristalino e que no processo de fabricação de açúcar, quando centrifugado produza o mais elevado rendimento de açúcar atendendo as classificações de açúcar como produto comercial. Em segundo é necessário que toda a quantidade de sacarose contida na matéria-prima se cristalize gerando alta porcentagem de cristais na massa, e que o mel final seja bem esgotado. (CAVALCANTE; ALBUQUERQUE, 2010).

No processo de cristalização devem-se considerar dois tipos de eficiência, uma que consiste na obtenção dos cozimentos comerciais com máxima recuperação envolvendo um número mínimo de etapas de cristalização, e uma segunda onde os subprodutos dos cozimentos de açúcar, os méis sejam esgotados ao máximo possível, e que sejam enviados para as destilaria com uma quantidade mínima de açúcar recuperável, para evitar perdas devido a presença de açúcares nos méis que não foram cristalizados.

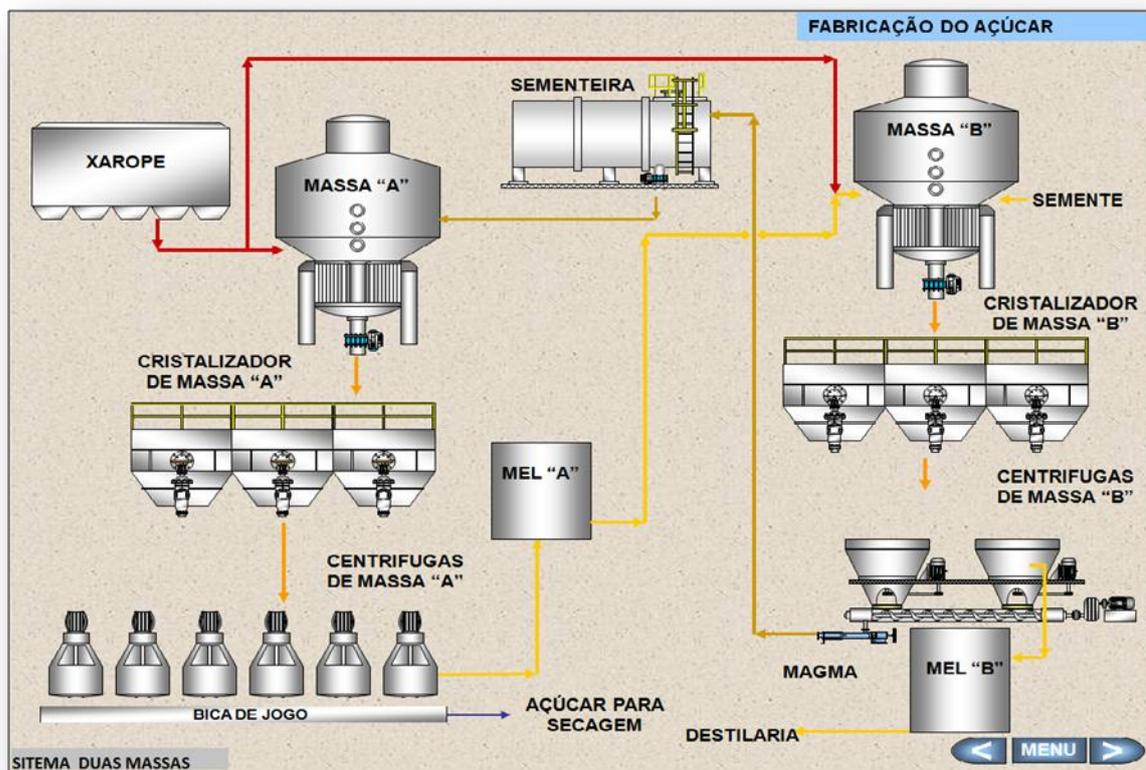


Figura 5 – Fluxograma sistema de cozimento de duas massas.  
Fonte: Gangorra (2007).

## 5.1 EXAURIMENTO DOS COZIMENTOS E CIRCULAÇÃO DE NÃO-AÇÚCARES.

É interessante obter a total cristalização de açúcar partindo da matéria-prima, o xarope e que se tenha um número mínimo de cozimento de purzas decrescentes entre massas e méis, até o mel final, normalmente a pratica mais comum e que trás melhores rendimentos na produção de açúcar cristal de qualidade é o sistema de três massas A,B e C, isso acontece mais comumente nas usinas que não possuem destilaria de etanol para atingir o máximo esgotamento reduzindo a pureza do mel final para provável venda para destilarias interessadas, nas usinas onde possuem destilarias é comum adotar sistemas de duas massas A e B, e nos dois sistemas a produção de açúcar “A” que é vendido como açúcar comercial. (ALBUQUERQUE, 2010).

## 5.2 SUPERSATURAÇÃO

A supersaturação é uma condição necessária para que ocorra a formação e o crescimento dos cristais de açúcar. É comum para que haja cristalização em produtos de baixa pureza, a supersaturação precisa mais alta do que para a cristalização em produtos de alta pureza. É importante verificar a relação de solubilidade, saturação, supersaturação, e a interferência dos não-açúcares nestas relações. (CAVALCANTE; ALBUQUERQUE, 2010).

Na temperatura de 50°C, se ocorrer o aumento na supersaturação de 1,05 para 1,15 teremos o aumento da taxa de cristalização em 5 vezes. (PAYNE, 2010).

### 5.2.1 TEMPERATURA

Se aumentar em 10°C a temperatura de um material a taxa de cristalização aumenta em 3,5 vezes, conforme tabela 1. (PAYNE, 2010).

## Temperatura e supersaturação

Tabela 1 – Temperatura e Saturação.

Temperatura (°C)	Supersaturação
70	1,25
60	1,30
50	1,35
40	1,40

Fonte: Payne (2010 p. 133).

### 5.3 SOLUBILIDADE

A solubilidade açúcar é muito importante, pois através da solubilidade podemos determinar a quantidade de açúcar puro dissolvido por peso de água, em função da variação da temperatura da solução. A solubilidade do açúcar na água, também pode ser alterada em função da pureza em que se encontra a solução, e também em função da natureza dos não-açúcares, lembrando que a pureza da solução afeta a solubilidade do açúcar, em qualquer temperatura. No licor mãe a sacarose tem a sua solubilidade aumentada muito quando a queda de pureza, gerando a diminuição da taxa de cristalização conforme tabela 2.

#### Dissolução do açúcar em água (100 g)

Tabela 2 – Temperatura e gramas de açúcar dissolvido

Temperatura	g de açúcar dissolvido
20	200
40	235
60	290
80	370
90	430

Fonte: ALBUQUERQUE (2010 p. 121).

## 5.4 SATURAÇÃO

Consideramos que uma solução se encontra saturada quando ela já contém a quantidade total de açúcar que é capaz de dissolver. (ALBUQUERQUE, 2010).

## 5.5 COEFICIENTE DE SUPERSATURAÇÃO

Não havendo cristalização em uma solução saturada, é imprescindível que seja criado um estado de supersaturação, sabendo-se que nenhum açúcar poderá ser dissolvido em uma solução saturada, processo que se inicia na eliminação de água, por evaporação, buscando aumentar a concentração da solução evitando ultrapassar o nível de saturação, antes de iniciar a cristalização. Em toda solução açucarada após passar pó processo de evaporação de uma parte de sua água, nos restará maior quantidade de açúcar, por unidade, comparado com o valor antes da evaporação. Em consequência o volume de água retirada de uma solução saturada por meio do processo de evaporação, determina maior ou menor grau de supersaturação, essa que é descrita pela relação entre a quantidade de sólidos dissolvidos por unidade de água, presente na solução supersaturada e que continha na solução saturada considerando a mesma pureza e temperatura. (ALBUQUERQUE, 2010).

Analisando as curvas de saturação nota-se que uma solução saturada, por exemplo, contém 363 partes de açúcar em cada 100 partes de água, sendo essa solução concentrada à temperatura de 80°C até que a solução chegue a 436 partes de açúcar por cada 100 partes de água, a supersaturação atingida é de:

$$436 / 363 = 1,20$$

## 5.6 ZONAS DE SUPERSATURAÇÃO

Zona insaturada: nenhum cristal se forma e qualquer um existente irá se dissolver.

Zona metaestável (saturada): aqui não aparecem cristais, mas há o crescimento normal dos cristais existentes, sendo que não é necessária alta a supersaturação, e assim não haverá a formação de novos cristais por cristalização espontânea.

Zona intermediária: essa zona encontra-se entre as zonas metaestável e a zona lábil, aqui nasce novos cristais e os existentes crescem, portanto há a possibilidade de formação de falsos grãos (poeiras) e também de conglomerados.

Zona lábil (supersaturada): aqui os cristais se formam espontaneamente, mesmo sem a presença de outros na massa. Aqui o crescimento é desordenado fugindo ao controle, e dando origem a conglomerados, geminados, cristais diferentes, poeiras, etc. No cozimento é importante evitar trabalhar nessa zona, podendo ser essa em decorrência do aumento da supersaturação ou de má circulação das massas dentro dos tachos de cozimento. (ALBUQUERQUE, 2010).

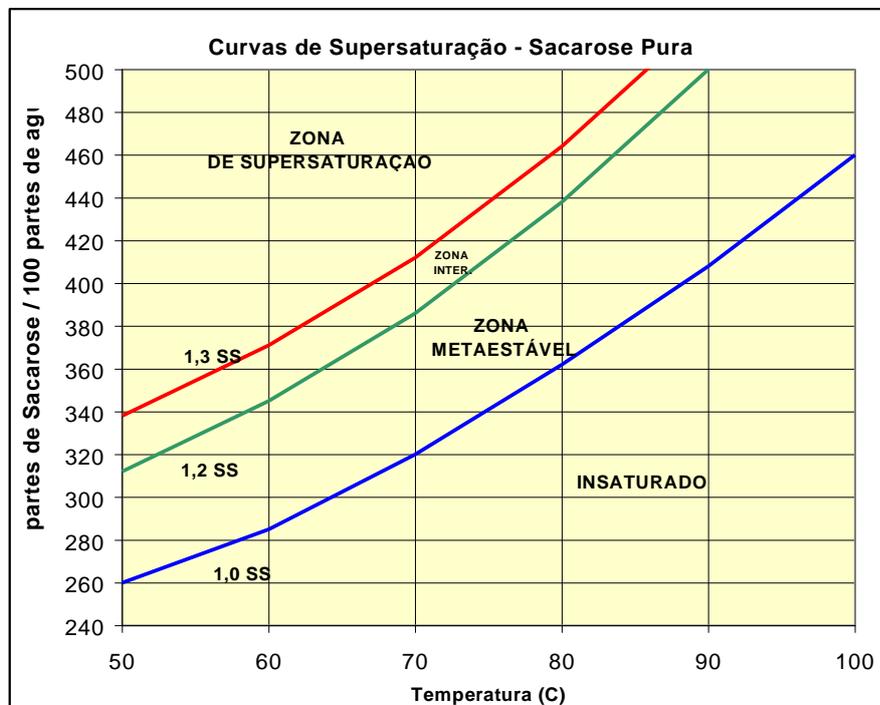


Figura 6 - Curva de supersaturação sacarose.

Fonte: REUNION consultoria Treinamento Processos de Cozimento do Açúcar. (2004 . p. 168).

A separação entre as duas primeiras zonas é muito variável e controversa já que depende da pureza do licor-mãe (figura 7 – Curva de supersaturação x pureza do licor mãe)

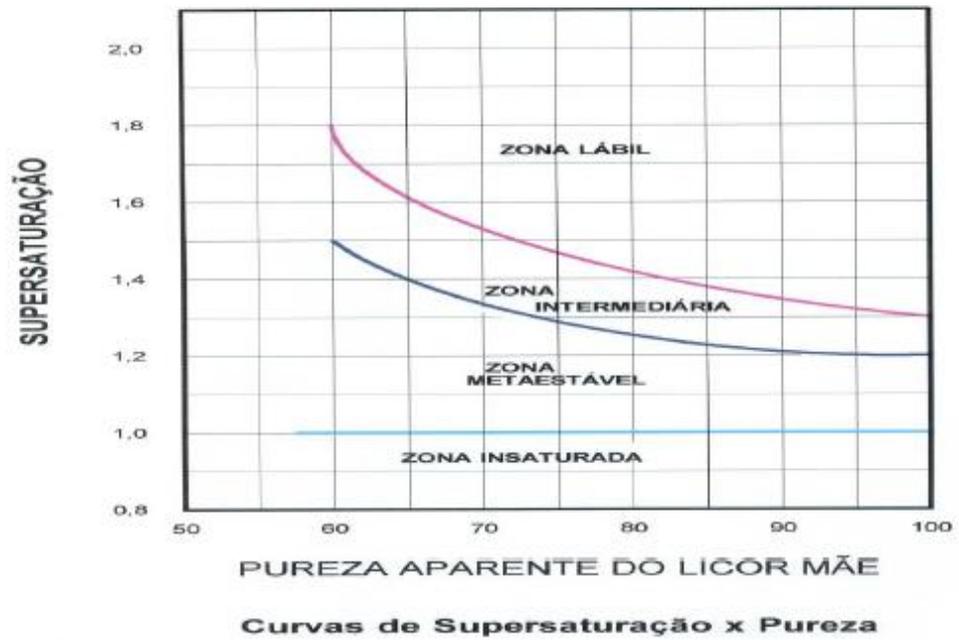


Figura 7 – Curva de supersaturação X Pureza.

Fonte: REUNION consultoria Treinamento Processos de Cozimento do Açúcar. (2004 . p. 30).

## 6 CRISTALIZAÇÃO

Consideramos que a cristalização não é somente o fenômeno de formação de cristal inicial, e sim todas as operações envolvidas para conduzir o crescimento do cristal ao tamanho desejado comercialmente ou de acordo com o uso pretendido. Portanto englobam-se nesses procedimentos todas as operações dos tachos de cozimento e os diferentes sistemas de massas cozidas. Os tachos de cozimentos são considerados o “coração” da fábrica de açúcar, pois esses exigem um apuro manejo durante suas fases operacionais, que em grande parte são os responsáveis pela recuperação geral da fábrica, variável que dá parâmetro para medir a eficiência da fábrica de açúcar, e pela qualidade do açúcar a produzir. A fábrica de açúcar quando bem operada conduz os tachos de cozimento focados em se conseguir massas cozidas de alta qualidade, propiciando boa centrifugação. (CAVALCANTE; ALBUQUERQUE, 2010).

Sendo a cristalização o primeiro passo da formação de cristal e exige um controle apurado onde todas as etapas devem se conduzidas corretamente, uma vez que a cristalização é a base para um bom processo. É conhecido que a solução de açúcar obtida a partir do processo de evaporação de água, elevada a um grau de saturação apropriado, para a produção de cristais de açúcar, nessas condições a cristalização torna-se simples e fácil, com todos os fenômenos físicos que ocorrem durante o cozimento.

Resumem-se os sistemas de cristalização em três métodos distintos:

Espera – cristalização espontânea

Choque – cristalização induzida

Semeadura – cristalização implantada (completo)

**Método de espera** - método mais antigo utilizado nas fábricas de açúcar, já não mais aplicado hoje por ser um método ineficiente e apresentar alguns pontos fracos, sendo baseado na concentração da solução até que apareçam cristais espontaneamente:

- dificuldade de controlar a quantidade de cristais formados
- devido à concentração excessivamente alta, é inevitável a formação de conglomerados; e
- método é recomendado para cristalizar com purezas elevadas.

**A cristalização induzida por choque** - esse método é muito similar ao anterior, o que difere é o fato de produzir os cristais quando a solução atinge um grau de concentração, sendo essa dada pela injeção de cristais no mesmo sistema, levando em consideração a vantagem de permitir o controle durante a fase e possibilitar a cristalização na zona metaestável.

**O método de sementeira completo** – esse é classificado como o melhor método para melhor estabelecimento dos cristais, nessa situação ela não se forma em absoluto no tacho uma vez que o controle não permite à supersaturação exceder uma zona favorável de trabalho que é a zona metaestável. Para isso é prudente de utilizar tachos automatizados munidos de instrumentos com alto grau de confiabilidade, que permitam conhecer a supersaturação correta durante todas as fases. (CAVALCANTE; ALBUQUERQUE, 2010).

Dos três métodos, o preferido é o terceiro que oferece as melhores condições de controle, isto, pois os dois primeiros métodos vão depender muito da experiência do operador, que é quem determinará a quantidade de cristais. Na granagem por sementeira total já se introduz no tacho a quantidade de sementes necessária para a quantidade final de cristais que se deseja na massa cozida.

Vantagens do sementeira total:

- padronização e rapidez das operações;
- controle do tamanho dos cristais obtidos;
- exaustão mais completados melaços;
- garantia da qualidade do açúcar.

Quanto maior a pureza menor a faixa segura de trabalho (zona metaestável). (CAVALCANTE; ALBUQUERQUE, 2010).

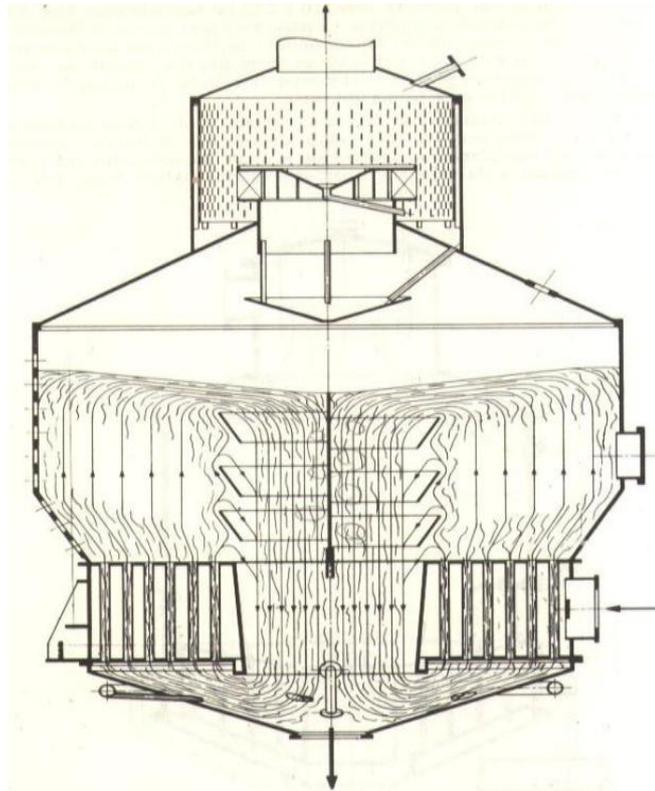


Figura 8 - Cozedor batelada, vertical com calandra fixa e plana.  
Fonte: RIBEIRO et al., 1999, p. 17.

## 6.1 EFICIÊNCIA DA CRISTALIZAÇÃO

Consideramos que a cristalização é eficiente pela percentagem de sacarose de uma solução é transformada em cristais.

Fatores que influenciam a cristalização:

- impurezas presentes nos méis e xarope (percentagem e tipos de não-açúcares);
- volume de pé de cozimento;
- granulometria do açúcar;
- controle automático da granagem e dos cozimentos;

quebra de cristais nas centrifugas contínuas; (CAVALCANTE; ALBUQUERQUE, 2010).

## 6.2 TAXA DA CRISTALIZAÇÃO

É a velocidade com que a sacarose contida no licor mãe migra para os cristais e depende principalmente do grau de supersaturação e da pureza do licor-mãe, bem como a viscosidade da massa cozida, sabendo que a temperatura tem grande influência sobre a viscosidade. (CAVALCANTE; ALBUQUERQUE, 2010).

Alta supersaturação provoca altas taxas de cristalização, mas isso não é interessante que ocorra, em virtude da grande possibilidade da formação de falsos grãos. (ALBUQUERQUE, 2010).

## 6.3 PREPARO DA SEMENTE

Para obter semente com alto grau de qualidade deve-se utilizar açúcar selecionado que não deve conter cristais conglomerados, geminados esses aparecerão no produto final uma vez que não serão diluídos, e açúcar já classificados com baixa cor e que apresente baixo coeficiente de variação da granulometria podendo ainda passar por um sistema de peneiramento para melhor seleção dos cristais. (CAVALCANTE; ALBUQUERQUE, 2010).

- Matérias constituintes: 1,0 kg de açúcar para cada 2,0 litros de etanol anidro.
- Moer em moinhos com esferas de aço inoxidável (15 e 20 mm de diâmetro), pelo maior tempo possível normalmente esse tempo varia de uma fabrica para outra, mas em comum é em torno 10,15, 24 horas a até 5 dias havendo essa possibilidade, obtendo uma pasta fina e regular.
- Deixar a semente descansar em tambores com movimento giratório lento sem esferas, por longos períodos de tempo (até 15 dias se possível).

Segundo REUNION (2004), a quantidade de semente a ser introduzida no tacho para cristalização, segue uma regra geral a utilização de cerca de 100 a 200 ml de pasta de semente para cada 100 hl (hectolitros) de massa cozida final a ser arriada.

Para exemplificar que para qualquer tipo de cozimento A, B ou C, a quantidade de semente pode ser alterada de acordo com a medição do tamanho dos cristais através da utilização de equipamentos para tal finalidade, como referencia o cozimento de massa B, de forma a se obter cristais com cerca de 0,25 a 0,30 mm. Importante que os colaboradores tenham em mão instrumentos, tal como lupa de aumento de 15 a 20 vezes que possibilite melhor observação da formação e crescimento dos cristais.



Figura 9 – Semente preparada para cristalização  
Fonte: Elaborado pelo autor.

## 7 QUÍMICA DO PROCESSO DE CRISTALIZAÇÃO

A química do processo de cozimento tem muitos aspectos devem diferenciar para uma compreensão da cristalização técnica da sacarose.

As características principais da química do processo de cozimentos são:

1. Decomposição da sacarose, especialmente a inversão;
2. Reações de decomposição, transformação e condensação dos açúcares redutores;
3. Decomposição e transformação, a precipitação e coagulação de não-açúcares;
4. Fenômenos relacionados com a solubilidade de diferentes tipos de não-açúcares inorgânicos;
5. Não-açúcares que afetam a cristalização da sacarose;
6. Fenômenos relacionados com a dissolução e recrescimento dos cristais de sacarose;
7. Efeito de não-açúcares precipitados sobre a pureza do açúcar centrifugado.

Partes destes fenômenos não pertencem estritamente ao campo químico. Alguns pertencem a campo especializado da física ou da físico-química, por exemplo, a inclusão do licor mãe no cristal da sacarose. (ALBUQUERQUE, 2010).

## 8 PUREZA DO MATERIAL A CRISTALIZAR

### 8.1 CRISTALIZAÇÃO EM MEIO DE BAIXA E ALTA PUREZA

A cristalização do açúcar permite ser conduzida dentro de uma ampla faixa de purezas. Nas massas em meio de baixa pureza, é mínima a chance do aparecimento de cristais indesejáveis, os conhecimentos adquiridos indicam que pureza muito baixa provoca o que se conhece por embotamento (enfraquecimento) do cristal, fazendo-o crescer poucos firmes e de sensação viscosa. No início da cristalização o cristal possui uma superfície de contato muito pequena, que aliado a baixa pureza do licor-mãe e as impurezas contidas no cristal, retardam o crescimento do cristal fazendo que ele cresça mais lentamente, gerando grande perda de tempo. Já em um meio com matéria de alta pureza ocorre um efeito inverso de um crescimento acelerado e anormal causando prejuízo e produzindo cristais não uniformes, além propiciar uma cristalização provinda de um pequeno aumento do grau de supersaturação. Literaturas e pesquisadores afirmam que juntam em decorrência da força osmótica. Nas soluções cristalinas em meios de baixa pureza, em virtude da pequena diferença na concentração de sacarose, a pressão osmótica não varia nas proximidades dos cristais, nessas condições são mínimas as possibilidades do surgimento de conglomerados e geminados.

Evidenciando que em cristalizações em baixas purezas, tem-se observado que em processos onde se processa a terceira massa em um cozimento de massa “C” é realizado com material de baixa pureza, resultam em cristais de boa uniformidade e regularidade, além de gerar um açúcar mais puro, livres de inclusões visíveis, o açúcar cristalizado em um meio de baixa pureza, em consequência da velocidade menor de crescimento que em um meio de alta pureza garante grande uniformidade dos cristais. (ALBUQUERQUE, 2010).

## 9 UNIFORMIDADES DOS CRISTAIS

A uniforme dos cristais está determinada em função de todas as operações e condições que descrevemos até o momento e também do processo de centrifugação que veremos em seguida. Cristais uniformes significam grãos com melhor absorção de sacarose, açúcar livre de impurezas e de melhor qualidade.

Na prática é quase impossível que os cristais de açúcar tenham tamanho uniforme, não somente pelo fato das partículas da semente moída originalmente não são uniformes, mas também pelo crescimento em velocidades diferentes. É importante manter uma boa circulação para manter quantidade mínima desses cristais reduzindo assim a quantidade de cristais indesejáveis. (CAVALCANTE; ALBUQUERQUE, 2010).



Figura 10 – Açúcar comercial de boa qualidade.  
Fonte: Cavalcante; Albuquerque (2010) p. 380.

### 9.1 CRISTAIS IRREGULARES

Os cristais irregulares não são os produtos de interesse a presença desses é ponto negativo para a produção de açúcar de qualidade, são influenciados por fatores controlados e não controlados. Os controlados são os que se manter uma boa operação dos tachos pode ser evitado o seu aparecimento, os que chamamos de não controlados são os oriundos de diversos tipos de deterioração da cana-de-açúcar ou de falhas em etapas de tratamento do caldo. (CAVALCANTE; ALBUQUERQUE, 2010).

## 9.2 CONGLOMERADOS

É mais comum encontrarmos esse tipo de cristal em massas cozidas de alta pureza onde a formação se dá com muita facilidade; em massas de baixa pureza nunca há formação de conglomerados. Sabendo que os conglomerados formados nunca se destroem. Eles se formam no limite da zona metaestável (supersaturação), comumente antes da formação de cristais falso. (CAVALCANTE; ALBUQUERQUE, 2010).



Figura 11 – Açúcar comercial com elevado teor de conglomerados.  
Fonte: Cavalcante; Albuquerque (2010) p. 382.

## 9.3 CRISTAIS GEMINADOS

Algumas impurezas determinam as características dos cristais. Na produção de açúcar a partir da cana-de-açúcar, as cristalizações acontecem em altas concentrações e elevado teor de açúcares redutores com tendência à formação de cristais gêmeos, isso se dá principalmente pela decomposição dos não açúcares e não pela condução operacional. A junção dos cristais ocorre pelo mel presente entre eles, provocando o aumento de cinzas e alterações na cor do produto final. (CAVALCANTE; ALBUQUERQUE, 2010).

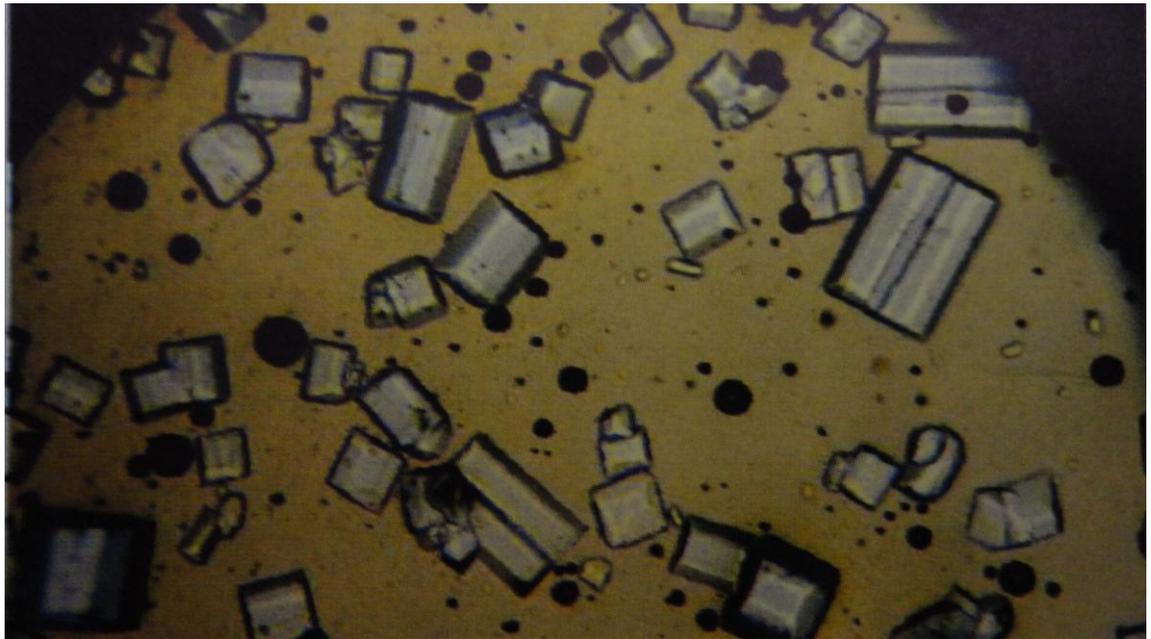


Figura 12 – Açúcar comercial com elevado teor de geminados.  
Fonte: Cavalcante; Albuquerque (2010) p. 382.

#### 9.4 CRISTAIS FALSOS

Segundo Cavalcante e Albuquerque (2010) a formação de falsos cristais de grande tamanho e com pouco núcleo, apresenta área mínima para cristalização e sua tem velocidade lenta de absorção do açúcar comparada com a da concentração por evaporação.

Fatores que contribuem para a formação de cristais falsos são:

- Evaporação alta, conduzida à elevada supersaturação;
- Circulação insuficiente;
- Mel com alta turbidez;
- Cristais no mel de alimentação;
- Entrada falsa de ar.

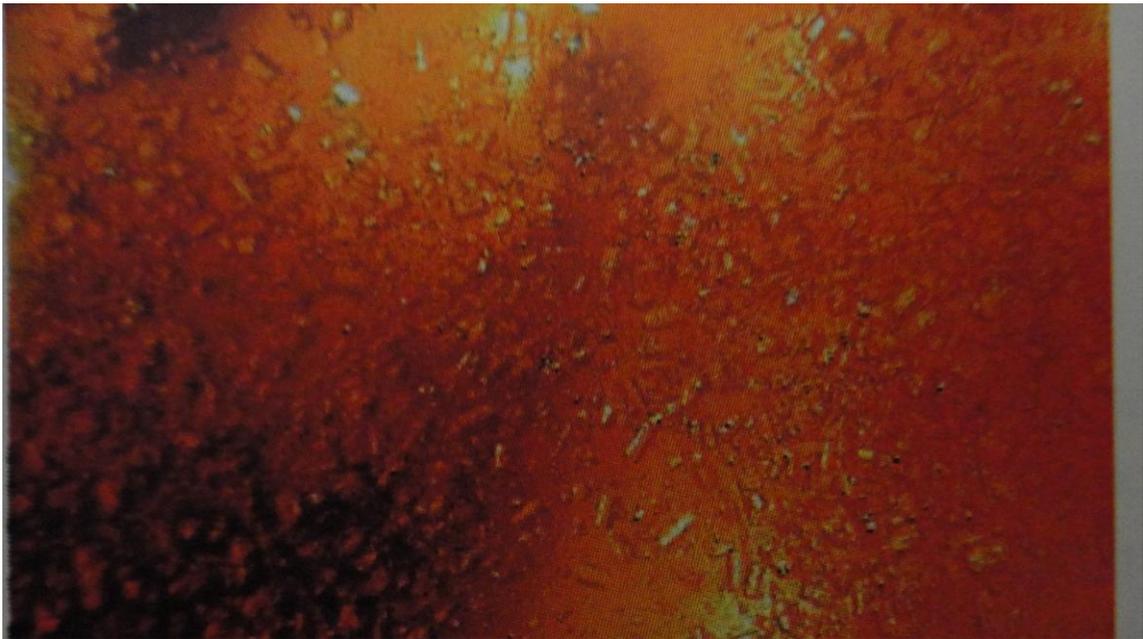


Figura 13 – Massa cozida de má qualidade com presença de cristais falsos.  
Fonte: Cavalcante; Albuquerque (2010) p. 383.



Figura 14 – Açúcar comercial de excelente qualidade.  
Fonte: Cavalcante; Albuquerque (2010) p. 380.

## **10 CONCENTRAÇÃO FINAL DE MASSA PARA DESCARGA**

Para que se consiga atingir bons resultados de recuperação de fabrica e boa centrifugação da massa cozida permitindo boa performance das centrifugas é de suma importância que quando o tacho atingir o seu volume final, fecha-se a alimentação do tacho e continua a evaporação de forma a obter a massa bem concentrada (apertada) até que a quantidade de água no licor-mãe seja a mínima, promovendo obter um mel bem esgotado.

Essa concentração se consegue no final do cozimento, mas a curva de cozimento traçada para o tacho já conduz todo o cozimento dentro da zona que permitirá chegar no final com uma massa concentrada bem próximo do valor de concentração para descarga, para otimizar o tempo de cozimento evitando perda de tempo no final para atingir a concentração desejada, para isso é importante estar atento a circulação da massa dentro do tacho que normalmente acontece por termocirculação pelo efeito da força do vapor ou por circulação mecânica realizada por agitadores.

Após a descarga é muito importante evitar o resfriamento imediato da massa que pode formar cristais secundários, por isso é interessante que a descarga seja feita em cristalizadores fechados. (CAVALCANTE; ALBUQUERQUE, 2010).

## 11 ESGOTAMENTO – RECUPERAÇÃO MÁXIMA DA SACAROSE

Após o cozimento, obtemos a massa cozida que é composta principalmente por cristais de açúcar e mel, esses são separados no processo de centrifugação realizados por centrifugas intermitentes que possuem um cesto constituído de uma contra-tela e uma tela com perfurações com diâmetros menores que o tamanho dos cristais. Nessas centrifugas o açúcar fica retido na tela e o mel escoia pelos orifícios e é direcionado para o tanque de o açúcar depois de separado do mel é descarregado em um transportado vibratório que o conduzirá para o processo de secagem, esse é denominado o açúcar de primeira e também com açúcar comercial.

O mel separado da centrifugação da massa A, contém em composição alto teor de sacarose que é açúcar cristalizável, porém com qualidade inferior sendo direcionado para o processo de cristalização e cozimento de uma massa de segunda, ou seja, como é conhecida de massa B. (OLIVEIRA, 1964 apud JESUS, 2004).

Esses operações e procedimentos podem ser repetidas, mas o número de massas é limitado, a medida que vai recuperando açúcar presente no mel o mesmo vai ficando cada vez mais pobre (baixa pureza), menor presença de açúcar e nem todo açúcar contido nele é cristalizável, tem um aumento da viscosidade dificultando sua operação, sendo assim quando já não é mais viável economicamente a recuperação de açúcar desse mel é denominado de melaço ou mel final e destinado as destilarias para a produção de etanol.

Existem vários métodos de esgotamento, porém todos consiste na queda de pureza do mel, um modo prático de se determinar a pureza é a relação entre POL (percentagem em peso de sacarose aparente) e Brix (percentagem em peso de sólidos solúveis em solução) ou seja:

$$\text{Pureza aparente \%} = 100 \text{ Pol} / \text{Brix}$$

Normalmente o método mais utilizado nas usinas do Brasil é o processo de duas massas cozidas, sendo uma massa cozida de primeira “A” e outra de segunda massa “B”. Poucas usinas trabalham com a terceira massa “C”, normalmente em unidades que não possuem destilarias, esgotar muito o mel final acarretaria em elevado custos na produção de açúcar e poderia provocar falta de matéria-prima para a produção de etanol.

A figura esquematizada abaixo ilustra um processo de cozimento de duas massas e suas saídas de méis.

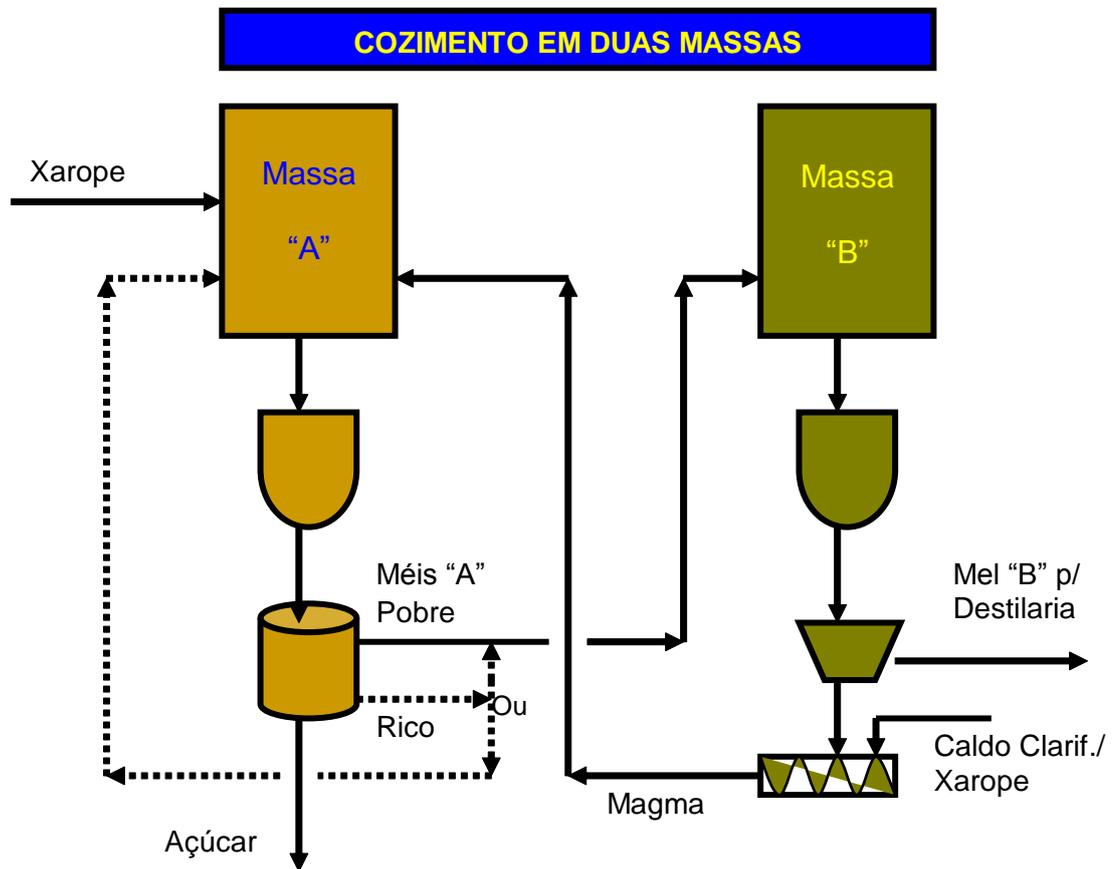


Figura 15 – Método de esgotamento de duas massas.  
Fonte: Reunion consultoria. (2004 . p. 46).

A figura acima mostra um sistema de cozimento de duas massas, uma de primeira com aproximadamente 81% de pureza, obtida a partir da magma B como pé de cozimento, e alimentado com xarope flotado nos cozedores de massa A, dessa massa obtém o açúcar de primeira que é o de interesse comercial.

A massa B de segunda apresenta pureza em torno de 60 a 70%, é obtida a partir do mel A provindo da centrifugação da massa A, ou da sua mistura com xarope nos cozedores de massa B. Da centrifugação da massa B obtém-se o magma B que será utilizado como pé de cozimento na massa A e o mel B final como matéria-prima para fabricação de etanol. Em poucas fabricas ocorre a diluição do magma B para então ser misturado ao xarope flotado, formando o feed solution, solução que sofrerá a granagem nos cozedores de massa A, gerando

o seed magma que será o pé de cozimento para os cozedores de massa A, esse processo exige alto nível de atenção dos operadores, por serem matérias de alta pureza. (O autor).

Segundo Hugot (1969, p.490), uma maneira de avaliar o processo de esgotamento é calcular a recuperação da fábrica que deverá ficar acima de 70%.

- Esgotamento da massa (HUGOT, 1969).

$$\% \text{Esgotamento} = \frac{(\text{Pureza}_{\text{ da _ massa}} - \text{Pureza}_{\text{ do _ mel}}) \times 100}{\text{Pureza}_{\text{ da _ massa}} \times (100 - \text{Pureza}_{\text{ do _ mel}})} \times 100$$

- Recuperação de Fábrica – Fórmula SJM

- R = Recuperação

- S = Pureza do Açúcar

- J = Pureza do Caldo

- M = Pureza do Mel Final

$$R(\%) = \frac{S(J - M)}{J(S - M)} \times 100$$

## 12 CENTRIFUGAÇÃO DO AÇÚCAR

O processo de centrifugação de açúcar tem por objetivo separação dos cristais do licor-mãe pelo efeito da força centrífuga e o emprego da água para lavagem de açúcar sempre preocupado com a adição mínima de água e o menor tempo possível, sabendo-se que o emprego de água em demasia causa derretimento do açúcar e afeta a eficiência da operação. (HUGOT, 1977).

Segundo Albuquerque (2010) a centrifugação é uma das operações unitárias mais importantes no processo de fabricação de açúcar, e desse processo os resultados obtidos em função de operações corretamente executadas são mais importantes do se considera, chamando a atenção normalmente quando ocorre um problema de ordem mecânica ou operacional.

Para uma boa centrifugação a qualidade da massa é o fator principal, massa de consistente com boa fluidez facilita o carregamento e centrifugação evitando pendulações nas centrifugas, exigindo o uso de pouca água para lavagem do açúcar. A pressão da água também deve ser considerada de extrema importância, quando se utiliza de um bombeamento com alta pressão conseqüentemente reduz-se o tempo de lavagem, evitando o derretimento de açúcar e gerando méis de menor pureza e quantidade, lembrando que a lavagem ineficiente compromete a qualidade do açúcar e a lavagem excessiva prejudica o esgotamento.

Normalmente são utilizados dois tipos de centrifugas as de bateladas (intermitentes) e as contínuas. As de bateladas tem um tempo de ciclo onde todas as funções são ajustadas de acordo com qualidade e a condição massa cozida, tendo especial atenção a de lavagem em função do tempo e da quantidade de água aplicada evitando que fique nenhum traço de mel entre os cristais, e o de secagem final para que se obtenha um açúcar não prejudique a operação dos secadores.

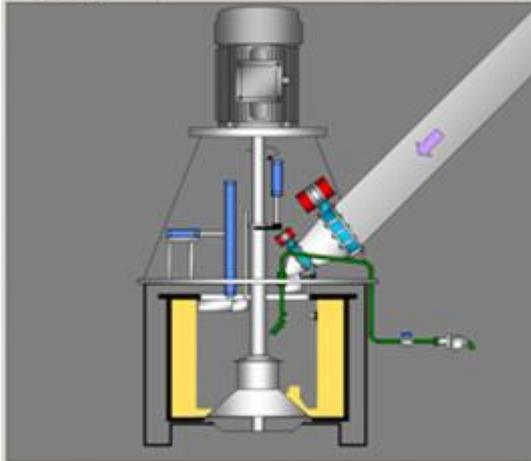
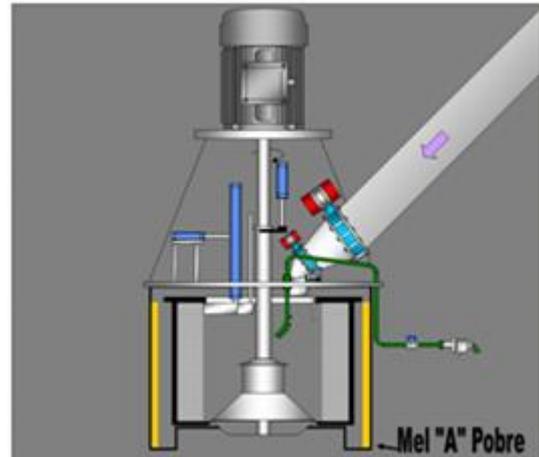
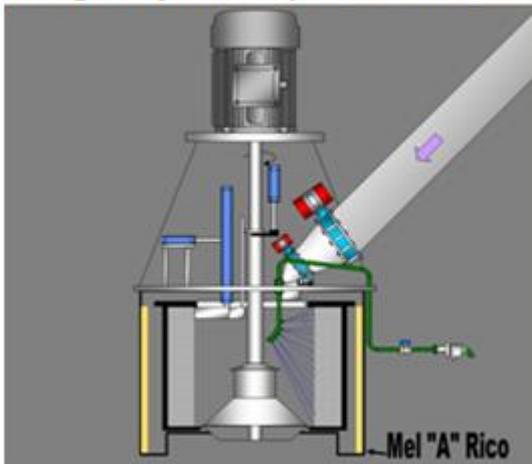
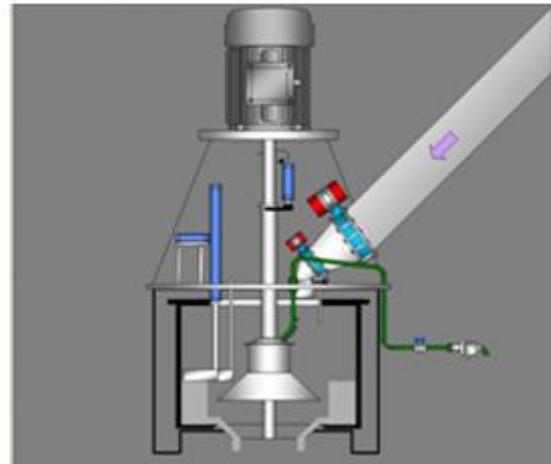
**Carregando com Massa****Separação do Mel "A" Pobre****Lavagem açúcar - Sep. Mel "A" Rico****Descarregando o Açúcar Cristal Branco**

Figura 16 - Fases das centrífugas intermitentes.  
Fonte: Gangorra (2007).

### 13 SECAGEM DO AÇÚCAR

A operação de secagem do açúcar consiste em simplesmente na redução da umidade por meio de injeção de ar quente e em outro estágio do tambor do secador o resfriamento simultâneo, até uma temperatura de aproximadamente na faixa de 30 a 40°C, que é uma faixa considerada ideal para estocagem por tempo prolongado garantindo que nessas condições não ocorrerá amarelamento e empedramento do açúcar no período de estocagem. O ar utilizado normalmente é captado do ambiente e forçado por meio de ventiladores industriais a passar por filtros para remoção de impurezas, nos dutos de saída de ar servido sai carregado com pó de açúcar que é direcionado para um sistema de recuperação de pó, conhecido como lavadores de pó, podendo ocorrer ainda perdas para atmosfera.

O secador de uso mais corrente é o de tambor rotativo, que consiste num cilindro metálico montado na horizontal, levemente inclinado 5 a 7° para facilitar a progressão do açúcar, este é provido internamente de aletas destinadas a recolher o açúcar e deixá-lo cair em forma de cascata. Geralmente o açúcar caminha ao longo do secador em contra corrente com o ar. Nos melhores projetos o corpo secador é dividido em 2 partes: a de secagem e a de resfriamento, alguns possuem em seu interior uma peneira rotativa que está acoplada ao corpo do secador para separar os açúcares que empedraram durante o processo, conhecidos como torrões.

Segundo Albuquerque (2010) percebe-se que a qualidade do açúcar não é estabelecida no processo de secagem, e sim nas etapas anteriores, bom controle das variáveis do processo de secagem irão garantir a preservação das características e boa estabilidade durante seu armazenamento, já quando mal operados ou sub-dimensionados tendem a piorar a qualidade do açúcar e propicia a degradação durante a estocagem, destacando-se o empedramento e aumento de cor.

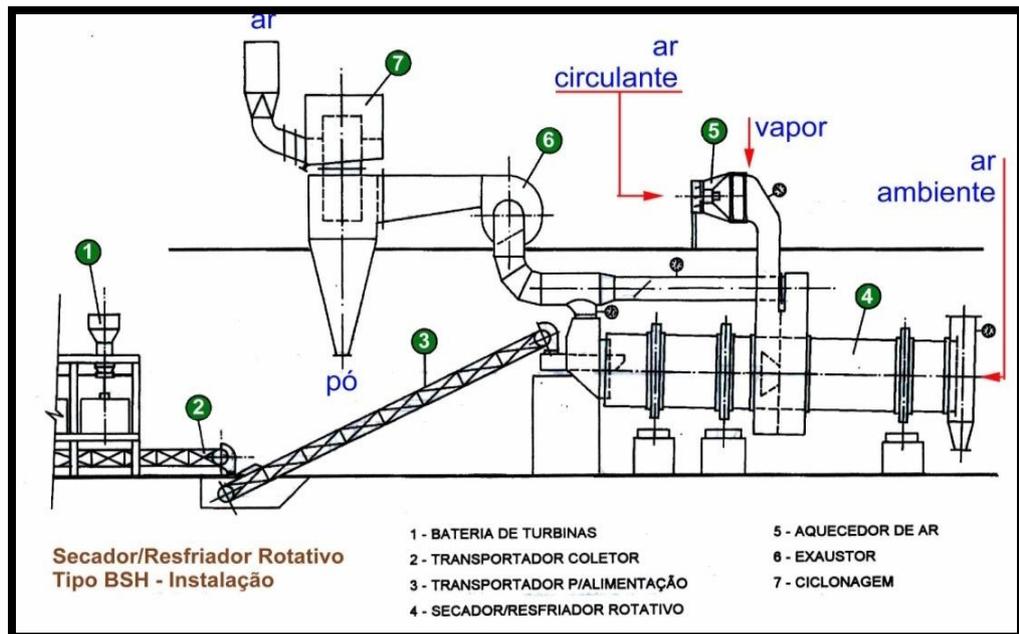


Figura 17 - Secador rotativo de açúcar.  
Fonte: EBA consultoria e treinamentos. (2002, p 246).

## 14 CONCLUSÃO

A partir das pesquisas e leituras realizadas para a elaboração deste trabalho, foi verificado que existem muitas técnicas que envolvem diversas áreas da física, química, da engenharia e sem descartar a experiência operacional nos processos de obtenção de açúcar cristal branco de qualidade a partir do cultivo e processamento da cana-de-açúcar.

Fica claro e salientado que para se produzir açúcar cristal branco de qualidade há grande necessidade de controle em todas as etapas, desde a escolha da variedade genética da cana-de-açúcar que é matéria-prima, e das etapas de preparo da cana para extração do caldo e um rigoroso tratamento do caldo já na fábrica envolvendo os tratamentos físico-químicos.

É comum nas usinas do Brasil dizer-se que a qualidade do açúcar se define nas etapas de tratamento do caldo, e que nas demais etapas do processamento pode-se ter um pequeno comprometimento da qualidade do produto final e não a melhora da qualidade.

Mas como visto ao longo do trabalho, todas as etapas contribuem positivamente para a qualidade e rendimento quando operadas corretamente, poucas etapas implicam na determinação de melhora da qualidade do produto, como por exemplo, a de secagem do açúcar que aparece com um foco mais de preservação das características do açúcar.

Nesse trabalho a observação realizada em todo o processo de cristalização e cozimento de açúcar forneceu um panorama geral da importância desse processo dentro da fábrica de açúcar no que se diz respeito à qualidade do açúcar, rendimento da produção e boa recuperação da fábrica. O processo de cristalização de baixa pureza permite um controle mais apurado, e melhor qualidade dos cristais, sendo mais fácil para o operador trabalhar nessas condições, o de cristalização e cozimento em alta pureza requer maior atenção e um controle mais fino pois os riscos de aparecimento de cristais indesejados é maior em função da má qualidade e excesso de quantidade de cristais.

O processo de cristalização e cozimento de açúcar é uma etapa do processo que desperta grande paixão aqueles que se dedicam a estudar esse fenômeno. Embora hoje existam excelentes técnicas, a automação entre outras facilidades continua sendo imprescindível a experiência dos operadores que durante toda a fase acompanham e analisam e quando necessário interferem na boa condução do processo.

Conforme cita Genie (1962 apud JESUS, 2004) “Cozimento não é uma arte, mas somente uma questão de observação e hábito.”

Na cristalização e no cozimento são tomadas ações para classificação do açúcar de qualidade e para atendimento aos clientes com mais variados tipo de uso pretendido.

## REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, F.M. **Processo de Fabricação do Açúcar**. 2. ed. Recife: Editora Universitária, 2010.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Cana de açúcar. **Ministério da Agricultura**, [2012?]. Disponível em: < <http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar>>. Acesso em 24 out. 2012.

EBA Consultoria Empresarial. **Pré-Fabricação do açúcar**. Lençóis Paulista, 2002. 135 slides.

Engenho Novo Tecnologia Ltda. **Processos de Flotação no Tratamento de Xarope de Açúcar**. Rio de Janeiro: Engenho Novo, 2002. 14 p. Apostila.

HUGOT, E. **Manual da Engenharia Açucareira**. São Paulo: Mestre Jou, 1969.

JESUS, C. F. D. **Validação da Simulação Dinâmica das Etapas de Evaporação e Cristalização da Produção com dados obtidos em Plantas Indústrias**. 2004. 214 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.

PAYNE, J. H. **Operações Unitárias na produção de açúcar de cana**. 2. ed. São Paulo: Nobel Stab, 2010.

CAVALCANTE, C. S.; ALBUQUERQUE, F. M. de. Processo de produção do açúcar. In: SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. (Ed.). **Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e álcool: tecnologias e perspectivas**. Viçosa, MG: [s.n.], 2010. cap. 14, p. 369-400.

\_\_\_\_\_. **UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR**. Ciclo econômico da Cana-de-Açúcar. **Única**, c2008a. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/content/show.asp?cntCode=8875C0EE-34FA-4649-A2E6-80160F1A4782>>. Acesso em 24 out. 2012.

\_\_\_\_\_. Cultivo da cana hoje: hoje. **Única**, c2008b. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/content/show.asp?cntCode=9E97665F-3A81-46F2-BF69-26E00C323988>>. Acesso em 24 out. 2012.

\_\_\_\_\_. Dados e cotações: estatísticas. **Única**, c2008c. Disponível em:  
<<http://www.unica.com.br/dadosCotacao/estatistica/>>. Acesso em: 24 de out. 2012.

O declínio do século XIX. **Única**, 2008. Disponível em:  
<<http://www.unica.com.br/content/show.asp?cntCode=99E1D9E6-5FE2-45AB-9E18-CD1E37C6B535>>. Acesso em 24 out. 2012.

\_\_\_\_\_. OS antigos engenhos. **Única**, c2008d. Disponível em:  
<<http://www.unica.com.br/content/show.asp?cntCode=6D0B18FA-17A8-4FC2-B0A6-26FE59BC33C3>>. Acesso em 24 out. 2012.

\_\_\_\_\_. SETOR Sucroenergético - Histórico. **Única**, c2008e. Disponível em:  
<<http://www.unica.com.br/content/default.asp?cchCode=%7BC2B8C535-736F-406B-BEB2-5D12B834EF59%7D>>. Acesso em 24 out. 2012.