

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA  
“LUIZ DE QUEIROZ”  
DEPARTAMENTO DE AGROINDÚSTRIA, ALIMENTOS E NUTRIÇÃO

FUNDAMENTOS DE TECNOLOGIA SUCROALCOOLEIRA

1ª parte:

TECNOLOGIA DO AÇÚCAR

Carlos A. F. Ribeiro

Solange A. G. Blumer

Jorge Horii

**Piracicaba**

**1999**

## ÍNDICE

	Página
1. INTRODUÇÃO	1
2. MATÉRIA-PRIMA PARA A INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA	2
2.1. A cana de açúcar como matéria-prima	2
2.2. Composição da cana de açúcar	3
2.3. Qualidade da matéria-prima	4
2.3.1. Fatores responsáveis pela qualidade da cana-de-açúcar	5
2.4. Determinação da maturação da cana	9
3. OPERAÇÕES PRELIMINARES DO PROCESSO AGROINDUSTRIAL	10
3.1. Colheita	11
3.2. Carregamento	12
3.3. Transporte	12
3.4. Pesagem	13
3.5. Avaliação da qualidade da matéria-prima	13
3.6. Descarregamento	15
3.7. Armazenamento	15
3.8. Lavagem da cana	15
4. PREPARO DA CANA PARA MOAGEM OU DIFUSÃO	19
4.1. Objetivos do preparo da cana-de-açúcar	20
4.2. Facas rotativas e desfibradores	21
5. EXTRAÇÃO DO CALDO	23
5.1. Extração do caldo por moendas	23
5.1.1. Ebebição	28
5.1.2. Eficiência da moendas	30
5.2. Extração do caldo por difusão	30
5.2.1. Tipos de difusores	31
6. PURIFICAÇÃO DO CALDO DE CANA: PENEIRAGEM E CLARIFICAÇÃO	33
6.1. Peneiragem	34
6.2. Clarificação	35

6.2.1. Defecação simples ou caleagem	35
6.2.2. Sulfo-defecação	37
6.2.3. Produtos auxiliares da clarificação	38
6.2.4. Aquecimento do caldo	39
6.2.5. Decantação do caldo	40
6.2.6. Filtração das borras	42
6.3. Consequências da purificação	43
7. EVAPORAÇÃO DO CALDO	44
7.1. Princípios da evaporação	44
7.2. Evaporação em Múltiplo-Efeito	45
8. COZIMENTO	49
8.1. Descrição de um cozedor clássico	52
8.2. Condução de um cozimento	53
8.3. Solubilidade	55
8.3.1. Coeficiente de super-saturação	56
8.3.2. Zonas de super-saturação	57
8.4. Sistema de cozimento	59
9. CRISTALIZAÇÃO DE SACAROSE	60
9.1. Princípio da operação de cristalização	60
9.2. Duração da cristalização	61
9.3. Tipos de cristalizadores	61
10. CENTRIFUGAÇÃO	62
11. SECAGEM DO AÇÚCAR	63
11.1. Secadores de açúcar	63
12. ESTOCAGEM	64
12.1. Características de um açúcar para ser armazenado	64
12.2. Empedramento do açúcar	65
12.3. Armazéns de açúcar	66
13. BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA	68

## 1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a cana-de-açúcar é importante fator sócio-econômico constituindo-se como base de três importantes agroindústrias - açúcar, álcool e aguardente - gerando resíduos e subprodutos como bagaço, que constitui uma importante fonte energética para a indústria, tornando-a auto-suficiente em energia, além de outros, tais como a torta de filtro e a vinhaça (adubos alternativos), a levedura seca, que possui uma vasta aplicação nos campos de alimentos e nutrição, e o óleo de fúsel que é aproveitado pelas indústrias de tintas e solventes.

Fatores edafo-climáticos fizeram com que a cultura se concentrasse principalmente no Estado de São Paulo, na região norte do Paraná, no sul de Goiás e no Triângulo Mineiro. Nestas regiões com características climáticas de inverno seco, necessária à maturação e conseqüente acúmulo de sacarose, e de primavera e verão com temperaturas e precipitação elevadas, que promovem o crescimento vegetativo, perfazem condições ótimas para seu cultivo, sob o ponto de vista agroindustrial.

Da constituição morfológica da cana de açúcar - rizomas, raízes, colmo, flores e folhas - apenas o colmo, sob o ponto de vista industrial, apresenta valor econômico por ser o órgão de armazenamento de carboidratos de reserva (sacarose, principalmente). Mas atualmente, as demais partes da cana têm levantado interesse dos técnicos do setor sucroalcooleiro, principalmente em função das mudanças no sistema de colheita que vêm sendo impostas por pressão ambiental dada pela proibição das queimadas. Esses carboidratos serão fermentados por leveduras para a produção de álcool ou então destinados à produção de açúcar pela cristalização da sacarose.

A agroindústria sucroalcooleira é um complexo que envolve vários campos da engenharia agrônômica, desde a produção e abastecimento da indústria com matéria-prima, passando pelo gerenciamento dos insumos, dos resíduos e dos subprodutos e da versatilidade da produção, quer seja de açúcar ou de álcool, culminando com o armazenamento e comercialização destes produtos. Estes aspectos devem se apresentar sob sincronismo tão perfeito quanto possível, exigência de eficientes técnicas de gerenciamento, operação das mais interessantes e complicadas, dado aos efeitos do inter-relacionamento das operações nos rendimentos industriais e na qualidade dos produtos, conforme será verificado no decorrer do curso.

## **2. MATÉRIA-PRIMA PARA A INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA**

### **2.1. A cana de açúcar como matéria-prima**

A cana de açúcar, em nosso País, constitui a principal matéria-prima para a indústria sucroalcooleira, sendo a produção de álcool a partir de outros vegetais, como o milho e a mandioca, inexpressivos.

Os principais motivos pelos quais a se adotou a cana de açúcar para a produção de açúcar e de álcool são:

a) Alta produtividade (cerca de  $100 \text{ t.ha}^{-1}$ ), que supera com larga vantagem a produtividade de outras culturas passíveis de serem exploradas, como a do milho por exemplo, que apresenta produtividade média brasileira de  $2 \text{ t.ha}^{-1}$  e raramente supera  $10 \text{ t.ha}^{-1}$ ;

b) Constituição do caldo, cujo carboidrato de reserva predominante e mais abundante é a sacarose (cerca de 17% (p.p<sup>-1</sup>) do caldo), a qual pode ser cristalizada pela evaporação do caldo no processo de produção de açúcar ou fermentada para a produção de álcool em conjunto com os demais açúcares prontamente fermentescíveis que a compõem, glicose e frutose principalmente. O carboidrato de reserva do milho e da mandioca é o amido, o qual não é diretamente metabolizado pelas leveduras comumente empregadas no processo de fermentação, sendo necessária a sua hidrólise prévia para que as leveduras o metabolizem, elevando o custo de produção.

c) Geração de bagaço, que constitui importante fonte de energia, dada pela sua queima nas caldeiras para a produção de vapor, necessário à várias operações do processo e à produção de energia elétrica;

d) Clima e solo favoráveis à instalação da cultura, permitindo que a cana vegete durante os meses de primavera e verão, e passe a acumular sacarose nas estações de outono e inverno;

e) Facilidade de cultivo e de colheita;

f) Tradição na cultura da cana.

### **2.2. Composição da cana de açúcar**

A matéria-prima para a indústria sucroalcooleira é caracterizada como sendo colmos de cana de açúcar em adequado estágio de maturação, pois no colmo é que são armazenados os carboidratos de reserva.

A composição química da cana é muito variável, em função das condições climáticas, das propriedades físicas, químicas e microbiológicas do solo, do tipo de cultivo, da variedade, do estágio de maturação e da idade, etc.

Em média a cana apresenta 74,5% de água, 25% de matéria orgânica e 0,5% em matéria mineral, com a ressalva de que estes constituintes não se encontram nas mesmas proporções nas diferentes partes do colmo.

Para o tecnologista a cana é constituída de fibra e caldo, o qual possui sacarose dissolvida, açúcar que será cristalizado ou convertido em álcool pelas leveduras.

A fibra, definida como o conjunto de substâncias insolúveis em água, é constituída, principalmente de celulose, lignina e pentosanas. O seu teor depende da variedade, da idade e de muitos outros fatores, variando na faixa de 10-16%.

O caldo, definido como uma solução impura e diluída de sacarose, é constituído de água (80%) e de sólidos solúveis (20%) . Os sólidos solúveis (brix) são agrupados em açúcares e não-açúcares orgânicos e inorgânicos. Os açúcares são representados principalmente pela sacarose, glicose e frutose. A sacarose, como o componente mais importante, tem um valor médio de 17%, enquanto que os demais, dependendo do estágio de maturação, 0,2 e 0,4%, respectivamente para a frutose e glicose.

Os não-açúcares orgânicos são constituídos de substâncias nitrogenadas (proteínas, aminoácidos, etc), gorduras, ceras, ácidos (málico, succínico, aconítico, etc) e de materiais corantes (clorofila, sacaretina e antocianina).

Os não-açúcares inorgânicos, representados pelas cinzas, têm como componentes principais: sílica, potássio, fósforo, cálcio, sódio, magnésio, ferro, cloro, alumínio, enxofre e outros.

A figura 1 resume a composição do colmo de cana.

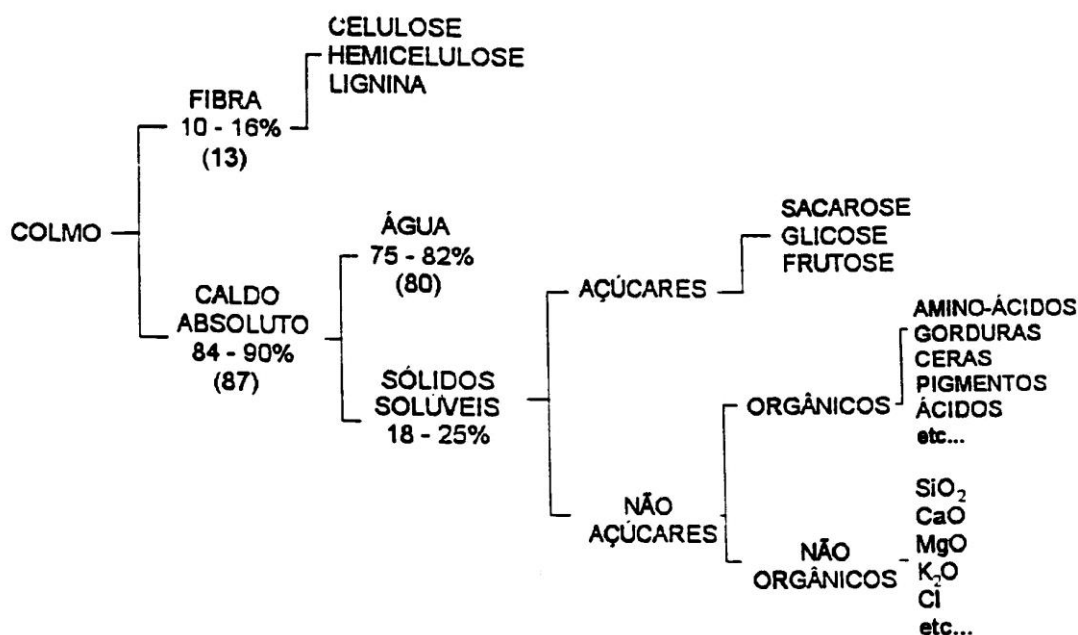


Figura 1. Composição do colmo de cana-de-açúcar

### 2.3. Qualidade da matéria-prima

A qualidade da cana para a indústria não pode ser avaliada simplesmente pelo seu teor de sacarose, ainda que seja o parâmetro mais importante, mas por uma série de outras variáveis responsáveis pelo êxito da indústria.

Na fibra, é tão importante o teor como a sua natureza. Os altos teores de fibra dificultam a extração do caldo, exigindo um melhor preparo de cana, bem como uma maior embebição. Os baixos teores de fibra diminuem a quantidade de bagaço, ocasionando o desequilíbrio térmico da fábrica. A princípio, as variedades de cana possuíam pouca fibra, gerando pouco bagaço; as variedades foram então sendo melhoradas para que se obtivesse melhores teores de fibra para a produção de energia.

Nas variedades que florescem, e que sofrem o fenômeno do “chochamento”, ocorre um aumento do teor de fibra, diminuindo a capacidade de moagem de cana, devido ao aumento de volume do material em processo.

No caldo, cuja composição depende da cana, interessa ao tecnologista o teor de sacarose, de açúcares redutores e de cinzas. A quantidade de sacarose presente no caldo é fundamental para um bom processamento e rendimento.

Os açúcares redutores - glicose e frutose - quando em teores elevados, mostram um estágio de cana imatura, ou, por outro lado, estágio avançado de deterioração.

Os componentes das cinzas do caldo, com exceção do fósforo, comportam-se como fatores negativos de recuperação de sacarose, especialmente no processo de cristalização, por serem melagênicos.

### **2.3.1. Fatores responsáveis pela qualidade da cana-de-açúcar**

#### a) maturação

Uma vez que o rendimento industrial é consequência do teor de sacarose da matéria-prima processada, a determinação do estágio de maturação é da maior importância dentre as operações preliminares da fabricação.

O período no qual a cana se encontra em condições adequadas para o processamento determina a safra da cana. Com o decorrer dos anos foram sendo selecionadas variedades para a ampliação da safra que, inicialmente, era de 60 dias e atualmente cerca de 6 meses.

A cana de açúcar no decorrer do seu ciclo atravessa dois períodos distintos com relação ao teor de sacarose. O primeiro, é o intenso crescimento vegetativo acompanhado por uma gradual formação de sacarose, enquanto que no segundo ocorre um predomínio acúmulo de sacarose, motivado pela escassez dos principais fatores de desenvolvimento vegetativo.

O processo fisiológico de maturação é afetado por vários fatores naturais, como a própria variedade, condições climáticas, tipo de solo e tratamentos culturais. As variedades comerciais de cana-de-açúcar têm comportamentos distintos, apresentando níveis diferentes de sacarose mesmo quando cultivadas nas mesmas condições, constituindo-se como base para o planejamento agrícola, o que possibilita o processamento de matéria-prima de bom teor de sacarose no decorrer de toda a safra, garantindo, desta maneira, um bom rendimento em todos os meses de processamento.

Para caracterizar o período em que uma cana pode ser processada, foi estabelecido o “período útil de industrialização” (PUI) e com base no critério adotado, estabelece-se o mínimo de 13% para Pol da cana, como sendo satisfatório para a industrialização de diferentes variedades. Assim, as variedades podem ser agrupadas em ricas, médias e pobres (figura 2).

Deve-se salientar que o limite mínimo de 13% não pode ser considerado rígido, devido as variações climáticas anuais. Em determinadas safras, este valor poderá ser menor ou maior, como por exemplo 12%.



Observa-se pela figura que as variedades precoces atingem a linha de base logo no início da safra por volta de abril-maio e a sua riqueza em sacarose continua a crescer até atingir a um máximo em agosto-setembro, para depois iniciar o declínio demonstrando possuir um PUI longo, acima de 150 dias. Deve-se ressaltar que existem muitas exceções a esse comportamento, isto é, variedades precoces de PUI curto.

As variedades médias irão alcançar o valor de 13% somente mais tarde, ao redor do mês de julho, mas, atingem o máximo de maturação em setembro, sem contudo ultrapassar a curva das precoces, e, logo entram em declínio, mostrando um PUI de 120 a 150 dias.

As canas tardias alcançam o valor mínimo para industrialização por volta de agosto-setembro; o PUI é curto, entre 70 a 120 dias e, de um modo geral, a sua riqueza em sacarose é inferior ao das variedades precoces de PUI longo. Deste forma, as variedades tardias tem um menor interesse industrial. Este critério de classificação foi válido no passado, quando se dispunha de um número restrito de variedades e poucos parâmetros científicos de melhoramento, apenas suficientes para a situação da época. Hoje, com a monocultura implantada, apareceram novas necessidades e, conseqüentemente, novos critérios de seleção para atender-las, não se conseguindo, até então, satisfazê-las com uma única variedade. Isso obriga o plantio de um grande número de variedades para que se consiga garantir o abastecimento da indústria com matéria-prima de qualidade durante todo o decorrer da safra, para se diminuir os efeitos negativos de clima, solo, pragas e doenças.

As variedades de cana também são classificadas quanto ao início da maturação em:

- precoce (maio-junho), que entra em maturação mais rapidamente;
- média ( julho-agosto);
- tardia ( setembro-outubro).

As condições climáticas têm influência marcante na maturação e sob condições de alta umidade no solo e elevada temperatura a cana-de-açúcar tem o seu crescimento intensificado, enquanto que em condições limitantes, aumenta a concentração de sacarose com conseqüente redução do teor de açúcares redutores. Em regiões irrigadas, a maturação é controlada pelo fornecimento de água.

As propriedades físicas e químicas do solo afetam a maturação. Assim, por exemplo, nos solos porosos e secos a maturação é mais rápida do que em solos compactos e úmidos. A adubação influenciando nas propriedades químicas do solo, provoca um retardamento da maturação sendo o mesmo efeito verificado em solos ricos em matéria orgânica. O efeito combinado de água-fertilizante-matéria orgânica, pode ser ocasionado pela aplicação de doses elevadas de vinhaça aos solos, responsável por altas produtividades agrícolas, mas por baixos teores de

sacarose na matéria-prima. Além disso, tratos culturais, idade da cultura, etc, podem afetar a maturação.

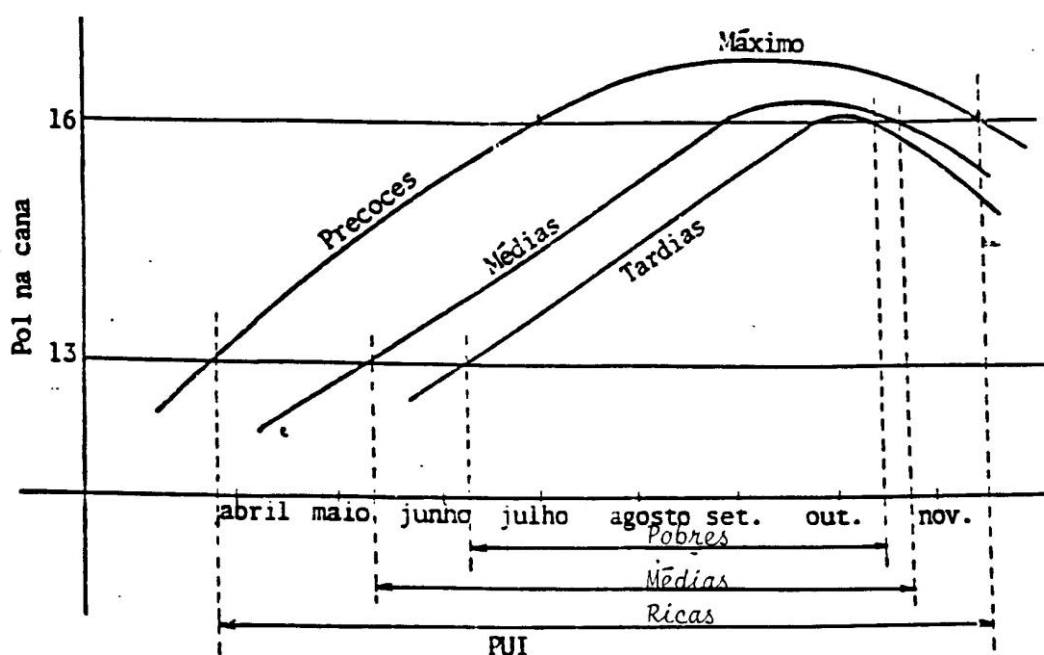


Figura 2: Comportamento das variedades de cana com relação ao PUI

Existem também os maturadores químicos que agem bloqueando o desenvolvimento vegetativo e a cana começa a acumular sacarose. É aplicado 4-5 semanas antes da colheita. São aplicados somente quando não se usa vinhaça na adubação. São herbicidas como ethrel e glifosate aplicados em menor dosagem. Extremo cuidado deve ser tomado pois alguns herbicidas ou dosagens elevadas podem provocar o apodrecimento do colmo, diminuindo a qualidade da cana.

#### b) matéria estranha

A qualidade da cana industrial é comprometida pela quantidade de impurezas carregadas com a cana de açúcar nas fases de corte-carregamento. A quantidade de impurezas - mineral e orgânica - é afetada pelas condições edafo-climáticas, aumentando em períodos chuvosos pelas condições deficientes de queima e carregamento.

A presença de impurezas na matéria-prima obriga a lavagem de cana, quando inteira, para o processamento, operação que é feita com investimentos e com perda de sacarose da ordem de 1 a 2%. As impurezas, além de afetarem a quantidade e qualidade da cana, causam o desgaste dos equipamentos, prejudicam o processamento e afetam a qualidade do produto final.

Na cana picada, entretanto, não pode ser procedida a lavagem devido à área exposta. Este tipo de cana também carrega maior teor de impurezas à fábrica, da ordem de 5 a 7%, constituídas por impurezas orgânicas como folhas de cana, principalmente, reduzindo a capacidade de moagem e a produção industrial.

#### c) deterioração e alteração de parâmetros tecnológicos e fisiológicos

Entre as alterações de parâmetros tecnológicos, fisiológicos e deterioração microbiológica, esta última é mais importante devido aos problemas que ocasionam nos processos de fabricação de açúcar, álcool e aguardente.

No colmo, o processo de respiração tem continuidade, com consequente consumo de açúcares, o que também constitui uma forma de deterioração. A transpiração ocorre ocasionando perda de água e consequente concentração do caldo, o que muitas vezes é interpretado erroneamente como benéfico. A transpiração causa assim um aumento relativo de fibra da cana, que além de dificultar a moagem provoca uma maior retenção de sacarose no bagaço.

A deterioração microbiológica da cana é decorrente da atividade microbiana que contamina o colmo após a queima e o corte, resultando no consumo de açúcares e na formação de substâncias como gomas (dextrana e levanas), ácidos orgânicos (lático e acético), além da presença do próprio microrganismo. As gomas, por exemplo, constituem problemas para as operações de clarificação, cristalização e centrifugação, tendo também uma participação na qualidade e estocagem do açúcar. Os ácidos orgânicos são inibidores do processo fermentativo. As deteriorações são consequência, principalmente, do tempo decorrido entre a queima e o processamento.

Com relação a cana picada (colhida através de colhedoras combinadas), o processo de deterioração pode ser agravado devido a maior área de exposição que favorece a contaminação com microrganismos pelo próprio equipamento de colheita, obrigando que o processamento seja efetuado o mais rápido possível, após o corte.

#### d) sanidade

O complexo broca-podridão é um dos fatores responsáveis pela depreciação da qualidade da cana, causando danos apreciáveis à agroindústria, diretamente proporcionais à intensidade de infestação. A queda de qualidade é verificada pela diminuição da pol da cana e

pureza, e aumento do teor de açúcares redutores, fibra e gomas. As galerias abertas no colmo pela broca constituem porta de entrada para microrganismos deterioradores.

São ainda importantes as doenças fúngicas (carvão, ferrugem), bacterianas (escaldadura, raquitismo) e viroses (sintomáticas ou assintomáticas) que contribuem para a senescência precoce das variedades.

#### e) florescimento

O florescimento em cana-de-açúcar é apontado como um defeito varietal e, sendo assim, a área de plantio das variedades floríferas deveria ser reduzida.

O florescimento pode trazer como consequência o “chochamento”. É importante salientar que existe uma dificuldade maior no processamento de cana com “chochamento”. A matéria-prima com menor teor de caldo provoca uma queda da eficiência de extração, devido não só ao aumento percentual de fibra mas, também ao volume ocupado.

## **2.4. Determinação da maturação da cana**

Tendo em vista que o rendimento industrial é função do teor de sacarose na matéria-prima, o processamento efetuado com canas em adiantado estágio de maturação resultará em maior rendimento.

A maturação, sendo um processo fisiológico governado por fatores diversos, necessita ser controlada para que se aproveite o máximo do potencial de sacarose das variedades de cana.

Os critérios para determinação da maturação são empíricos e técnicos. Os empíricos são a aparência e a idade do canavial. Ambos são falhos, porque a maturação sendo uma condição fisiológica da planta pode ser afetada por vários fatores, particularmente por umidade e temperatura que nem sempre tem distribuição regular nos diversos anos agrícolas.

Os sistemas técnicos mais empregados são as análises de cana no campo e no laboratório. A análise da cana no campo restringe-se à determinação de brix do caldo, o qual expressa a porcentagem de sólidos solúveis (brix (% m.m<sup>-1</sup>)). Esta determinação é feita com o auxílio do aparelho denominado refratômetro de campo, o qual mede o brix do caldo em função de seu índice de refração. Como o teor de sacarose aumenta com o teor de sólidos solúveis e dada a correlação existente entre ambos, especialmente em canas maduras, o brix refratométrico se apresenta como uma forma simples e correta de determinação do estágio de maturação.

No decorrer do processo de maturação, o maior acúmulo de sacarose se dá inicialmente na base da cana, em seguida no meio do colmo, até se igualar praticamente ao teor da base, o

que também coincide com o acúmulo na ponta que tende a se igualar as demais partes. Entretanto, no momento que o acúmulo de sólidos na ponta tende a se igualar ao do meio, o da base declina, normalmente devido a planta entrar em novo período vegetativo motivado pelo restabelecimento dos fatores de crescimento vegetativo. Assim, admite-se que a cana está madura quando o teor da base e do meio são praticamente iguais e o da ponta ligeiramente inferior.

As determinações tecnológicas laboratoriais fornecem dados mais precisos do estágio de maturação, sendo a rigor uma confirmação dos resultados do refratômetro de campo. No laboratório são realizadas as determinações do brix, pol (porcentagem de sacarose aparente em massa), açúcares redutores (expresso em % de açúcar invertido em massa por volume) e calculada a pureza, segundo a fórmula:

$$P(\%) = \frac{Pol}{brix} \times 100$$

Deve-se salientar que nem sempre o corte da cana segue critérios técnicos de determinação da maturação, podendo-se assim determinar o corte dependendo da situação econômica na qual se encontra a empresa. Claro que tal procedimento leva a menores rendimentos industriais, sendo apenas justificado em situações críticas de caixa.

### **3. OPERAÇÕES PRELIMINARES DO PROCESSO AGROINDUSTRIAL**

As operações que antecedem a entrada da matéria prima na indústria, operações preliminares, consistem na colheita da cana, carregamento, transporte, pesagem, pagamento da cana pela qualidade, descarregamento, armazenamento e lavagem. Tais operações devem constar de um programa de abastecimento sincronizado com as operações industriais para que não ocorra sobreabastecimento, o que provocará maior tempo de armazenamento com conseqüente queda da qualidade, ou falta de cana para a moagem, ocasionando atrasos na produção. A garantia deste sincronismo é de extrema complexidade, pois muitas vezes as paradas não são programadas pela manutenção preditiva, ocorrendo quebras ocasionais de equipamentos, obrigando todo um rearranjo do planejamento de abastecimento para minimizar o tempo de armazenamento, culminando com sobras de cana cortada no campo. As chuvas impedem a queima da cana para o corte, podendo atrasar o abastecimento e, conseqüentemente, provocar paradas na indústria por falta de matéria-prima.

As operações preliminares ao processamento industrial são a seguir relatadas.

### 3.1. Colheita

Após a determinação do estágio de maturação, procede-se o corte dos canaviais que apresentem níveis de sacarose satisfatório em função da época.

A colheita pode ser : - manual  
- mecânica

Na colheita manual primeiramente procede-se a despalha pelo fogo, desde que a área se encontre fora do perímetro urbano e no mínimo a 1Km da área urbanizada, objetivando aumentar o rendimento de corte e diminuir a quantidade de impureza vegetal. Porém, logo após a queima iniciam-se as perdas de sacarose por exsudação, o que obriga que o corte seja efetuado logo em seguida ou em período tão curto quanto possível. Além disso, a exsudação provoca a aderência de terra nos colmos, o que promove o arraste de terra para a indústria e a contaminação microbiana com perdas significativas de açúcar, fazendo com que se proceda a lavagem da cana, obrigatoriamente, para a remoção destas impurezas minerais. O rendimento médio é de 6 a 8 toneladas de cana.cortador<sup>-1</sup>.dia<sup>-1</sup> e, o tempo médio entre corte e carregamento neste sistema de colheita situa-se acima de 48 horas, com influência negativa na qualidade da cana advinda da deterioração.

O corte mecânico feito através de combinadas (corte-carregamento) tem sua participação aumentada nos últimos anos, devido a fatores ambientais (em pouco tempo não se poderá mais queimar cana, de acordo com a legislação estadual), fatores econômicos (apesar do custo de implantação do corte mecanizado ser alto, o rendimento é muito maior – 45 a 50 TCH - bem como comparativamente menor o custo de colheita) e até mesmo por dificuldade de mão-de-obra, por se tratar de a colheita ser um emprego temporário, muitas vezes terceirizado ou empreitado e, não raras as ocasiões, com problemas sociais e trabalhistas, quando não humanitários.

A cana cortada mecanicamente (especialmente a cortada em toletes) deve ser processada imediatamente, para evitar a rápida deterioração em função da maior área exposta.

### 3.2. Carregamento

Após o corte, a cana é carregada mecanicamente através das carregadeiras, que tem o inconveniente de carregar muitas impurezas minerais, o que é agravado nos períodos chuvosos.

Além de depreciar a matéria-prima, provocam desgastes nos equipamentos e interferem negativamente no processamento.

O teor de impurezas minerais que chega à indústria situa-se entre 4 a 15% da carga do caminhão de transporte. Trata-se de uma grande quantidade de terra que deve ser removida da matéria-prima e retornada ao campo, gerando custos com transporte e reciclagem.

Uma tentativa de diminuir o carregamento de solo pela operação de carregamento é a orientação para que os cortadores amontoem a cana cortada, o que por se tratar de mais uma operação delegada ao cortador, implica na redução da produtividade de corte.

Em cana colhida mecanicamente, o carregamento é pode ser efetuado pela própria colhedora (combinada), diminuindo drasticamente o teor de impurezas minerais. Tais impurezas encontram-se em situações de colheita mecânica, principalmente em função do arrancamento de touceiras, problema que pode estar associado à variedade de cana, às técnicas de plantio ou ao equipamento de colheita, principalmente quanto ao estado das navalhas de corte.

### 3.3. Transporte

O transporte de cana deve prover a demanda diária de trabalho da usina ou destilaria, o que é feito ainda quase que totalmente durante o período diurno. Existem unidades que transportam também à noite.

As máquinas que efetuam o transporte de cana no País são muito diversas, em função do tipo e pavimentação do terreno. O sistema de transporte de cana que predomina no Brasil é por caminhões, com carroceira dotada de fueiros ou telados (esta para cana em toletes), e em menor proporção por carretas tracionadas por tratores, nas condições de terreno acidentado.

O peso das cargas varia de acordo com a capacidade dos caminhões variando da seguinte forma:

caminhão toco .....	7-8 t
caminhão truck.....	12-16 t
caminhão Romeu e Julieta.....	25-32 t
caminhão treminhão.....	45-54 t

caminhão carreta.....25-30 t

Para a elaboração do programa de transporte utiliza-se, usualmente, as velocidades médias de tráfego de  $40 \text{ km.h}^{-1}$  quando o caminhão está trafegando vazio e  $20 \text{ km.h}^{-1}$  carregado.

### 3.4. Pesagem

A pesagem de cana nas unidades produtoras tem por objetivos principais o controle da produtividade agrícola, o pagamento dos fornecedores de cana e o controle do rendimento industrial. É efetuada por balanças situadas na entrada da indústria, sobre todos os caminhões que nela entrarem.

### 3.5. Avaliação da qualidade da matéria-prima

A remuneração da cana entregue nas indústrias, atualmente, é feita com base na qualidade da matéria-prima. A sistemática de pagamento de cana pela qualidade foi implantada gradativamente em todo o país, tendo sido dimensionados os parâmetros regionais para cada Estado. O sistema é dinâmico, sendo ajustados no decorrer das safras os parâmetros que compõem a fórmula de avaliação da matéria-prima. O sistema envolve: amostragem e preparo da amostra, extração do caldo, determinações analíticas e processamento dos dados.

A amostragem consiste na retirada de 3 amostras em diferentes pontos da carga do veículo sorteado, obedecendo uma das seis combinações básicas, empregando-se uma sonda mecânica. Tais pontos situam-se em 3 diferentes alturas e 3 diferentes distâncias longitudinais da carga, procurando-se assim, uma amostra representativa da carga de cana. Atualmente estão sendo implantadas sondas oblíquas que atravessam a carga do caminhão, permitindo uma só perfuração para a amostragem, resultando em economia de tempo e de mão-de-obra.

O preparo da amostra consiste na reunião das três amostras obtidas em cada uma das três perfurações, desintegrá-las e homogeneizá-las.

A extração do caldo é conseguida pela prensagem de 500g da amostra homogeneizada em uma prensa hidráulica sob condições fixas de pressão e tempo, procurando seguir-se as condições de operação da moenda, resultando em um caldo extraído e um resíduo fibroso, denominado bagaço prensa, que é utilizado no cálculo indireto do teor de fibra da cana. A análise compreende as determinações de brix e pol, sendo que através do teor de fibra e de coeficientes, os dados de caldo são convertidos em cana. O uso do NIRS (Near infra-red



system) também vem sendo implantado no sistema de pagamento e exaustivamente estudado devido às suas necessidades de calibração para as condições locais. Este sistema promove vantagens quanto a velocidade e ao número de determinações.

O valor da cana é obtido levando-se em conta as perdas industriais, a pol da cana, a pureza do caldo, a distribuição do açúcar (açúcar e melaço) e o valor do quilo do açúcar “standard”.

O fluxograma das operações para a avaliação da qualidade da cana para o pagamento é ilustrado na figura 3.

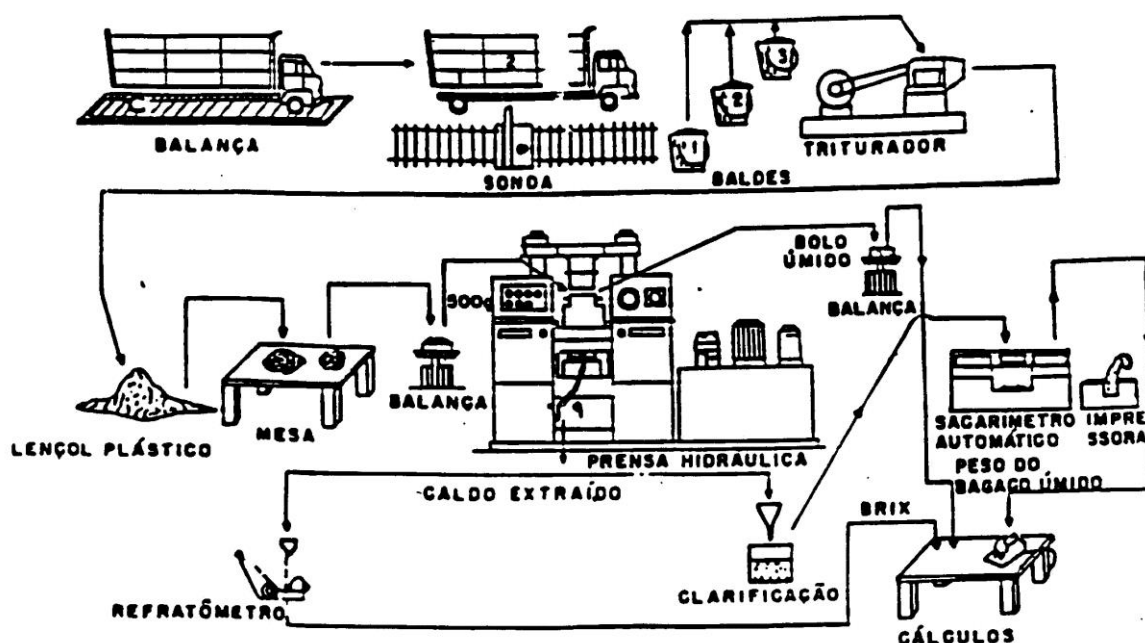


Figura 3. Fluxograma do sistema de pagamento de cana pela qualidade

### 3.6. Descarregamento

É feito mecanicamente, através dos seguintes equipamentos:

- guindaste não rotativo móvel (ponte rolante) ou fixo;
- guindaste rotativo, auto-sustentáveis ou sustentados por cabos;
- basculante lateral ou de topo dos veículos transportadores;
- guindaste lateral do tipo “hilo”;
- plataforma basculante.

Na maior parte das indústrias é utilizado o hilo, cabendo à ponte rolante o transporte de cana dentro do armazém, quando existente.

### **3.7. Armazenamento**

Considerando que as usinas e destilarias trabalham numa jornada diária de 24 horas e que o corte é realizado praticamente durante o dia, torna-se necessário prover o armazém de cana para garantir o processamento noturno. O armazenamento de cana se limita principalmente a atender a demanda noturna, mas também em parte o processamento do domingo, quando a maioria dos fornecedores paralisam suas atividades.

Como o colmo de cana é uma matéria-prima deteriorável, a distribuição desta cana no depósito deve ser muito bem controlada, a fim de que o processamento seja efetuado com as canas que chegaram primeiro. Com esta medida pode-se minimizar os problemas de deterioração da cana estocada. Convém ainda salientar que cana picada não pode ser armazenada, devido estar sujeita a uma deterioração muito rápida, enquanto que as canas inteiras permitem uma maior flexibilidade.

Outra consequência indesejável do armazenamento é o maior amassamento de cana, quer seja por seu empilhamento ou pelo maior número de operações de transporte, o que causa perda direta de caldo (açúcar) e abertura de maior número de portas de entrada para microrganismos deterioradores.

### **3.8. Lavagem da cana**

As canas que não vão para o armazenamento seguem para o processamento, sendo descarregadas diretamente nos receptores - mesas laterais e esteira auxiliar de cana - a fim de alimentar o processo. Estes receptores se destinam a alimentar a esteira principal que conduz aos equipamentos de preparo e, posteriormente, à moenda ou ao difusor, ainda com a função de lavagem da cana, no caso de canas inteiras (figuras 4, 5, 6, 7 e 8).

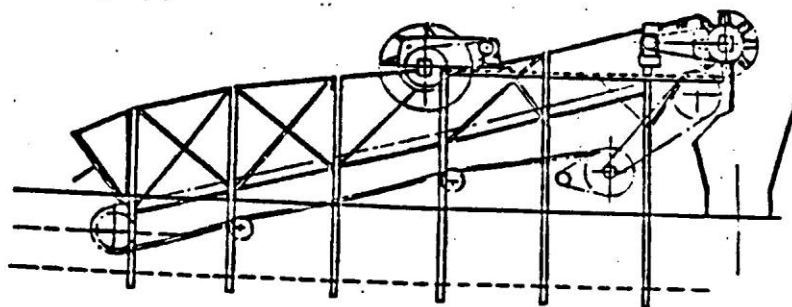


figura 4. Mesa lateral inclinada com nivelador

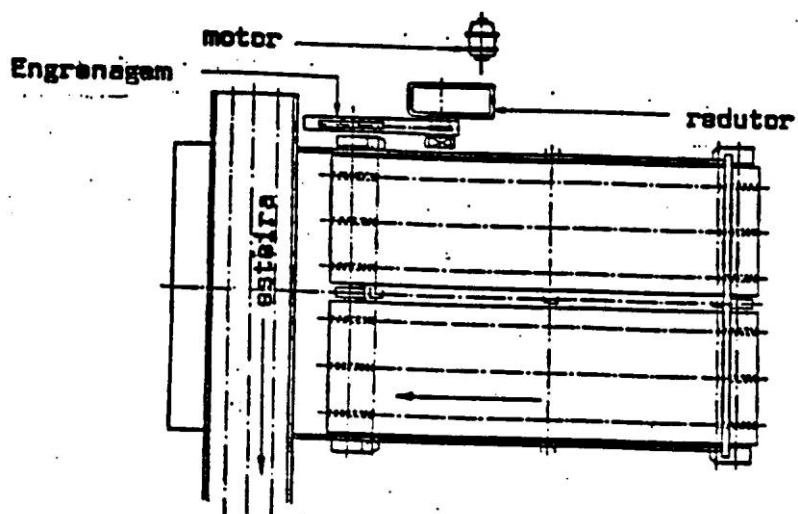


figura 5. Mesa lateral de forro fixo e correntes móveis

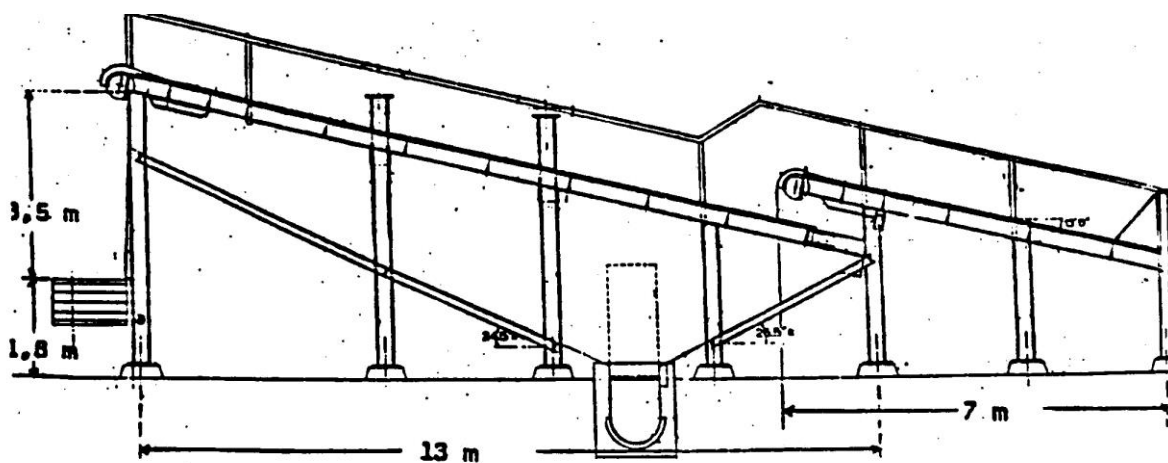


figura 6. Esquema de uma mesa lateral inclinada de forro fixo e correntes móveis, para lavagem de cana.

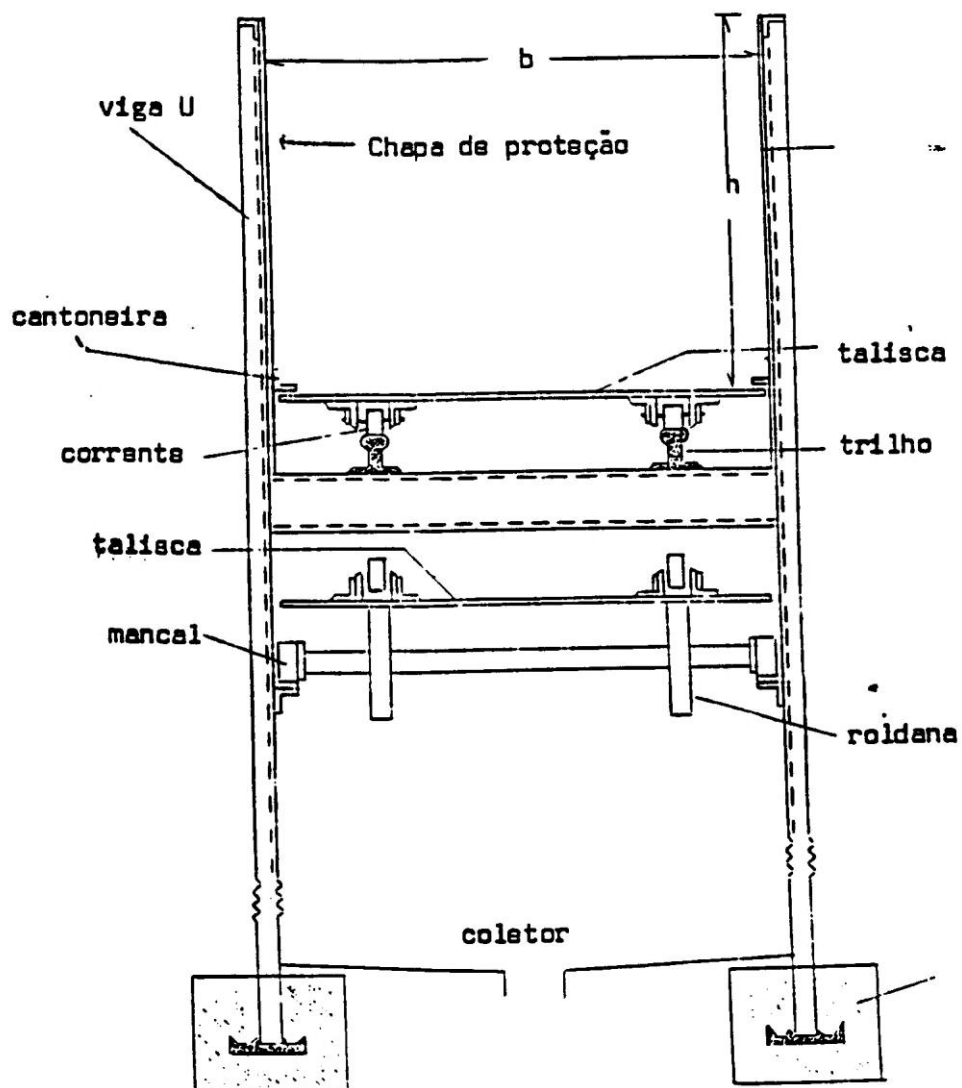


figura 7. Vista lateral da esteira de cana

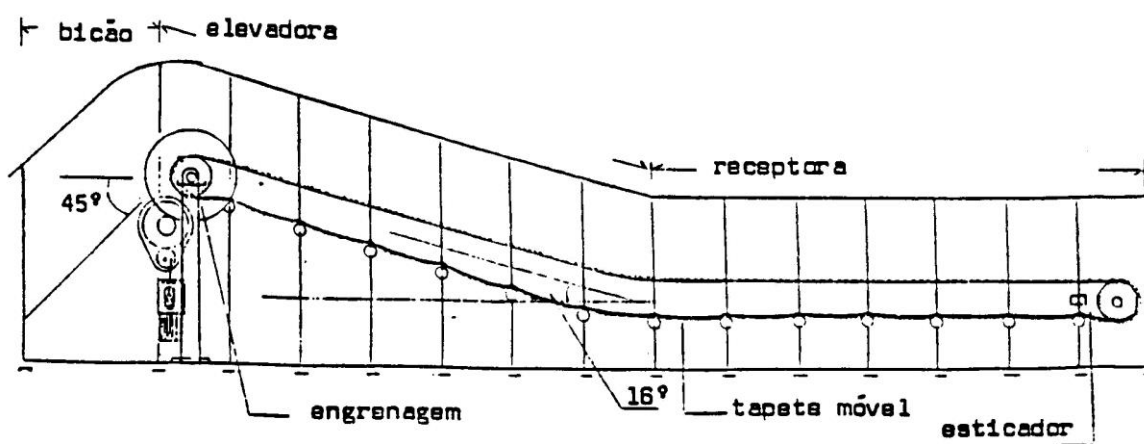


figura 8. Vista transversal da esteira de cana

Durante o corte-carregamento, uma quantidade de impurezas - mineral e orgânica - é carregada aderida à superfície dos colmos, influenciando no processamento e na qualidade do açúcar e desgastando os equipamentos.

Por isso, é necessário lavar a cana com a finalidade de eliminar as impurezas minerais, principalmente. Este tratamento é realizado com água aplicada diretamente nas canas (inteiras) nas mesas laterais de alimentação, nas esteiras auxiliares ou mesmo na esteira principal, antes da cana receber ação preparadora das facas. As águas residuais da lavagem de cana apresentam alto potencial poluidor obrigando a unidade industrial a possuir sistemas de tratamento antes de descartá-las do processo. Algumas unidades fazem tratamentos (decantação e calagem) antes de retornar ao processo.

As mesas receptoras devem possuir diferentes inclinações, sendo mais comum as mesas com dupla inclinação (15 e 45°) para uma melhor distribuição e exposição da cana à água de lavagem

Cana picada não pode ser lavada, por apresentar maior área exposta à lixiviação de caldo pela água de lavagem, representando grandes perdas de sacarose.

O consumo médio de água nesta operação é de cerca 5 a 10 m<sup>3</sup>.t<sup>-1</sup> de cana.

#### **4. PREPARO DA CANA PARA MOAGEM OU DIFUSÃO**

O preparo da cana-de-açúcar para a extração tem sido uma operação indispensável à boa performance das moendas.

Como se sabe, o açúcar acha-se dissolvido nas células do parênquima da cana, estando assim, bastante protegido pelas paredes de tecidos fibrosos e aparentemente duros. A parte dura do colmo (nós e casca) é da ordem de 25% do peso da cana, encerrando 15% do caldo, representa uma área de difícil extração, justamente pela sua dureza, exigindo pressões extremamente elevadas de extração. O preparo da cana vem então para facilitar a extração do caldo das partes duras da cana, melhorando conseqüentemente a extração do caldo presente nas partes moles (parênquima dos entre-nós). Há a necessidade de romper esses tecidos para facilitar o trabalho de esmagamento pelos frisos das moendas.

O preparo da cana para a moagem são realizadas por jogos de facas rotativas e desfibradores.

#### 4.1. Objetivos do preparo da cana-de-açúcar

O preparo da cana-de-açúcar tem como objetivo o aumento da capacidade e da eficiência de extração, através:

- a) da destruição da resistência das partes duras, exigindo menor pressão das moendas para a extração desejada e, conseqüentemente, menor desgaste;
- b) do rompimento dos vasos celulares, para uma maior exposição das células à ação das moendas ou ao desfibramento;
- c) da produção de uma massa fibrosa, densa e homogênea, diminuindo espaços vazios nas esteiras, aumentando-se assim a capacidade de extração.

Com a utilização de facas e desfibradores, tem-se as seguintes vantagens:

- a) aumento da eficiência das moendas
  - capacidade: massa de cana moída em toneladas por hora ( de 10 a 30%)
  - extração: porcentagem de pol extraída em relação à pol da cana ( de 5 a 10%)
- b) aumento da densidade do colchão de cana, o que representa aumento da capacidade pela diminuição de espaços vazios a serem processados
- c) permite a utilização de menores pressões hidráulicas, uma vez que o caldo está exposto pelo rompimento das células
- d) contribui para uma melhor homogeneização do colchão de cana
- e) ocasiona a melhoria das condições absorptivas do bagaço em função da diminuição do tamanho das fibras e, conseqüentemente, do aumento da superfície de absorção
- f) permite um menor desgaste das moendas
- g) permite aumentar a velocidade das moendas
- h) uniformiza a fibra

#### 4.2. Facas rotativas e desfibradores

As facas rotativas são constituídas pelas seguintes partes:

- base de concreto: objetivo de dar apoio ao jogo de faca
- base metálica e mancais
- eixo de aço carbono
- suporte das facas em aço carbono e facas: destinado a fixar as facas
- cofre protetor em chapa de aço carbono
- volante de aço carbono

As lâminas são de aço carbono especial , característica que lhes dá durabilidade, resistência, elasticidade, tenacidade e boa têmpera. O revestimento especial com solda dura permite a boa execução do trabalho de preparo.

As facas rotativas são classificadas em niveladoras e cortadoras (figura 9)

As niveladoras têm por função regularizar e uniformizar o fluxo da carga de cana que cai desordenadamente na esteira. São em menor número e as suas pontas ficam mais distantes do fundo da esteira, cortando a cana em toletes.

As cortadoras são em maior número e estão com a ponta mais próxima do fundo da esteira. As facas cortadoras cortam com mais intensidade as canas, reduzindo aquela massa grosseira em uma camada densa e uniforme de pequenos pedaços da matéria-prima.

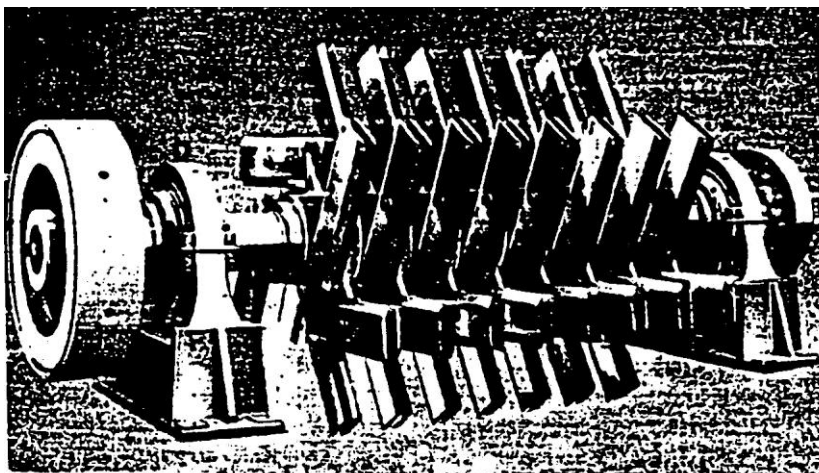


figura 9. Facas cortadoras

A regulagem de uma faca cortadora é vista na figura 10.

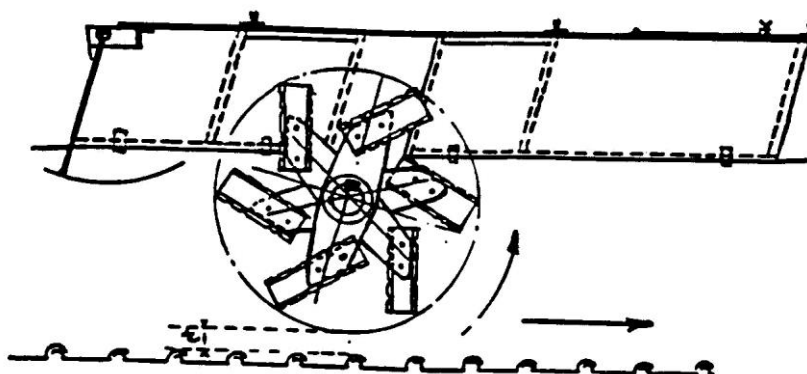


figura 10. Regulagem de uma faca cortadora

As facas rotativas são acionadas por turbina a vapor.

Dentre os desfibradores mais usuais no Brasil estão os modelos Copersucar.

O desfibrador é composto de um rotor central, constituído de eixo de aço, suportes e martelos, de um tambor alimentador e de uma placa desfibradora. Os suportes dos martelos têm a forma triangular. Nas pontas dos triângulos passam os eixos ou varões os quais prendem os martelos que trabalham de forma oscilante. Na parte anterior e superior do rotor central é instalado um tambor alimentador de grande diâmetro, nervurado, que tem por função conduzir a cana entre o rotor central e a placa desfibradora.

A placa desfibradora, localizada na parte posterior do rotor central, é de aço fundido, de forma curvada, mostrando nervuras recobertas de solda dura. Esta placa está assentada distante dos martelos em cerca de 5 a 7 mm.

Todo o conjunto é protegido por um cofre de chapa protetor.

O desfibrador é assentado na parte inclinada do esteirão, após um jogo de facas rotativas. Tal equipamento promove o rompimento das células, conseguindo-se entre 90 a 94% de células abertas, melhor expondo o caldo ao processo seguinte de extração, por este estar agora absorvido pela fibra e não mais encerrado dentro de uma célula do parênquima de armazenamento. A eficiência do desfibrador é mais importante no processo de extração por difusão do que por moagem.

Esta operação eleva a eficiência de extração em cerca de 5%, o que corresponde à instalação adicional de um terno de moenda,

## **5. EXTRAÇÃO DO CALDO**

A extração do caldo consiste no processo físico de separação deste da fibra (bagaço), sendo efetuado basicamente por dois tipos de processo: moagem ou difusão.

Na extração por moagem, a separação é feita por pressão mecânica dos rolos da moenda sobre o colchão de cana desfibrada e na difusão, pela movimentação da sacarose de uma área de maior para uma área de menor concentração. Tais processos serão detalhados a seguir.

### **5.1. Extração do caldo por moendas**

A cana-de-açúcar intensamente picada e desfibrada, chega as moendas através de uma bica inclinada, metálica ou através de um alimentador vertical, tipo Chutt-Donnelly. O Donnelly é



mais usado quando se tem a esteira de alta velocidade (figura 11), por constituir barreira física que impede que a cana desfibrada sobreponha o rolo superior. Anteriormente a instalação da calha Donelly, havia a necessidade do rolo alimentador (top-roller), situado acima do rolo superior, com a função de evitar esta sobreposição. A utilização da calha Donelly permite ainda uma melhoria da embebição pela esteira de arraste empregada neste sistema, que carrega pequenas quantidades de bagaço entre um e outro terno, diminuindo a formação de caminhos preferenciais da água, expondo-o de melhor forma à embebição. Sua disposição vertical ainda permite alimentação constante da moenda e o monitoramento da alimentação pelo controle automático de velocidade da esteira (figuras 14a, 14b e 15).

Com o aumento da capacidade de moagem advindo do preparo da cana, foi necessária a instalação do rolo de pressão (press-roller), cuja finalidade é a de manter constante o fluxo de alimentação do terno de moenda.

A cana desfibrada chega a primeira moenda, recebendo aí a primeira compressão entre o cilindro anterior e superior e uma segunda compressão entre o cilindro posterior e o superior. Tem-se, pois, um caldo conhecido como “primário”. O bagaço resultante segue pela esteira intermediária para o 2º terno de moagem, recebendo novamente duas pressões, tal qual como mencionado anteriormente. Os esmagamentos se sucedem para os ternos seguintes.

O bagaço final, saindo numa umidade em torno de 50%, segue para as caldeiras onde se produz vapor, que será consumido em todo o processamento e no acionamento das próprias moendas.

Durante a passagem do bagaço de uma moenda a outra, realiza-se a embebição que nada mais é do que uma adição de água ou caldo diluído.

As moendas são constituídas de 3 cilindros posicionados de forma triangular. Os cilindros inferiores trabalham rigidamente em suas posições, enquanto o superior trabalha sob o controle de uma pressão hidráulica.

Um terno de moendas é constituído das seguintes partes:

- base metálica;
- castelo: são as estruturas que sustentam os cilindros esmagadores, sendo assentados cada um na sua base metálica; construídos de ferro ou aço fundido;
- mancais: são peças destinadas a suportarem os eixos das moendas, são construídas em bronze e assentadas nas fendas dos castelos;
- cilindros ou rolos: são constituídos de eixo de aço especial revestido centralmente por camisas frisadas de ferro fundido. O cilindro superior é responsável pelo acionamento dos dois inferiores (rola cana e rola bagaço) através de engrenagens (rodetes) colocadas nas duas extremidades dos eixos;

- pentes: têm por função manter limpos os frisos das camisas dos cilindros, após o esmagamento;

- bagaceira: localizada entre os dois cilindros inferiores e sob o cilindro superior. Tem por função manter limpos os frisos do cilindro inferior (rola cana) e facilitar a condução da cana parcialmente esmagada para o segundo esmagamento que ocorre entre o cilindro inferior (rola bagaço) e superior (figuras 12 e 13).

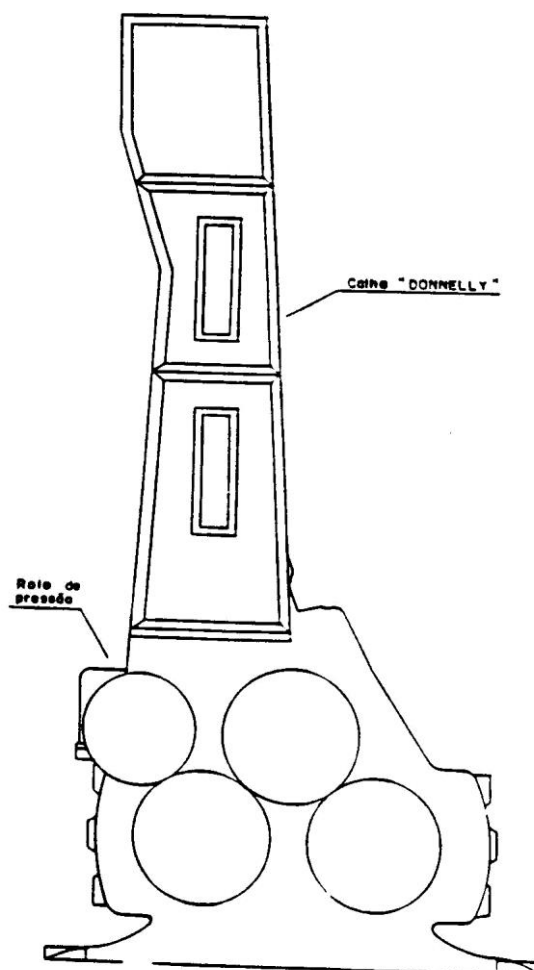


Figura 11. Esquema simplificado da moenda com calha "Donnelly"

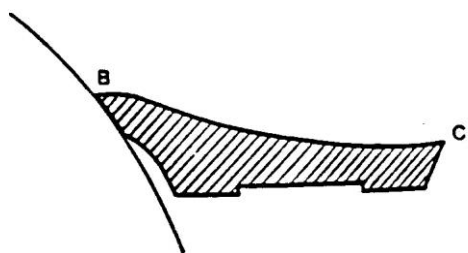


Figura 12. Forma do dente da bagaceira

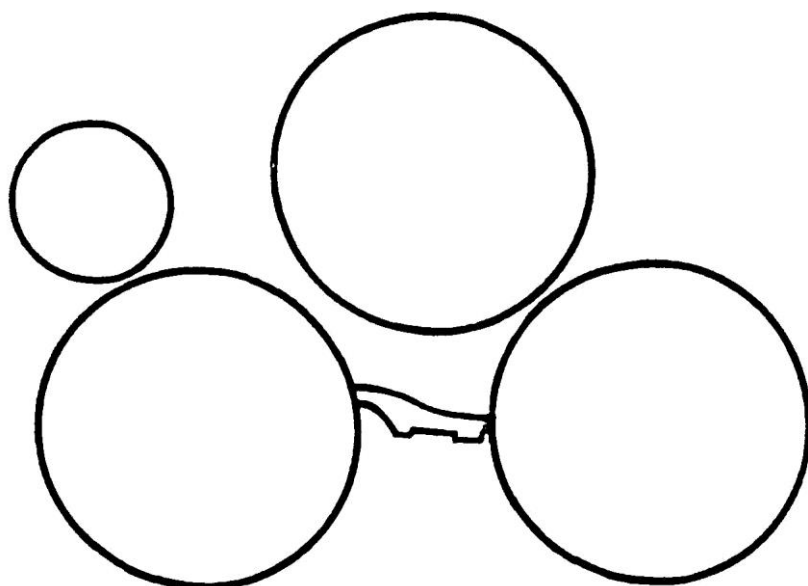


Figura 13. Disposição da bagaceira num terno de moendas

As peças acima descritas compõem um terno de moenda. Atualmente uma bateria de moendas é composta por 4, 5 ou 6 ternos.

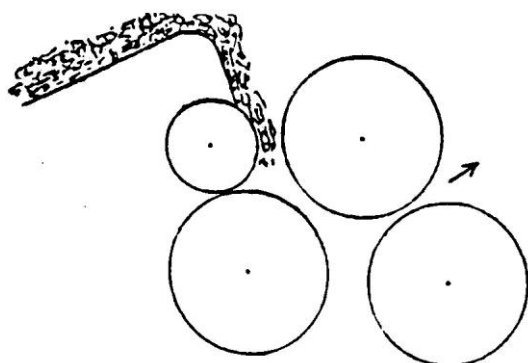


Figura 14a. Posição do press-roller

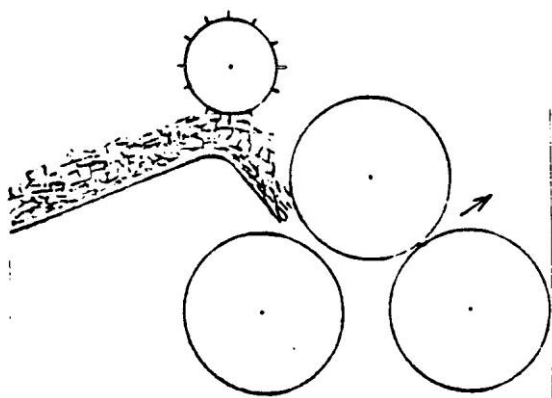


figura 14b. Posição do rolo de compressão

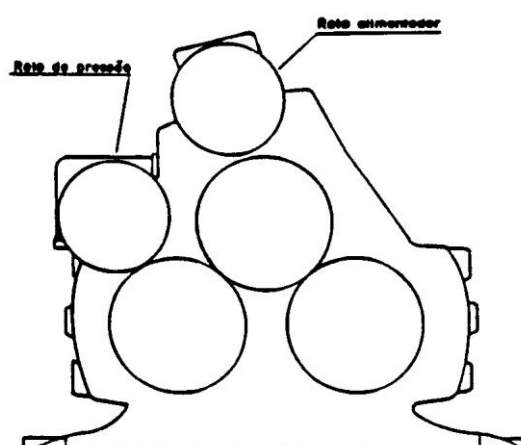


Figura 15. Esquema simplificado da moenda de 5 rolos, com rolo de pressão e rolo alimentador

As moendas são acionadas por turbinas a vapor, acopladas a redutores para movimentar o rolo superior à uma velocidade de 5 a 7 rpm.

Com a finalidade de aumentar a eficiência de extração, efetua-se a embebição do bagaço entre os ternos de moenda, processo mostrado a seguir.

### 5.1.1. Embebição

Entende-se por embebição, a adição de água ou caldo diluído ao bagaço entre uma moenda e outra, com o objetivo de se aumentar a extração de sacarose.

A água atua como diluente do caldo preso às células do parênquima da cana, existindo uma espécie de troca com o mesmo. Pela compressão, é possível tirar assim, um pouco mais de açúcares ou de sólidos solúveis retidos nas células do bagaço.

A embebição com água pode ser aplicada entre o primeiro e o segundo terno, entre o 3º e 4º, entre o 4º e 5º e entre 5º e 6º terno se o tandem for de 6 ternos. Neste caso, se tem o que se chama de “embebição simples”. Por embebição composta, a mais utilizada, entende-se a aplicação de caldo diluído, oriundo das últimas moendas. Neste caso, a água é sempre aplicada entre os dois últimos ternos e caldo aí obtido é retornado para um ponto anterior. Há, pois, sempre o retorno do caldo da moenda em trabalho para o bagaço em esmagamento no terno anterior. Nos dois casos de embebição (simples ou composta), esta pode ser simples, dupla, tríplice, etc..., segundo os pontos de aplicação (figura 16).

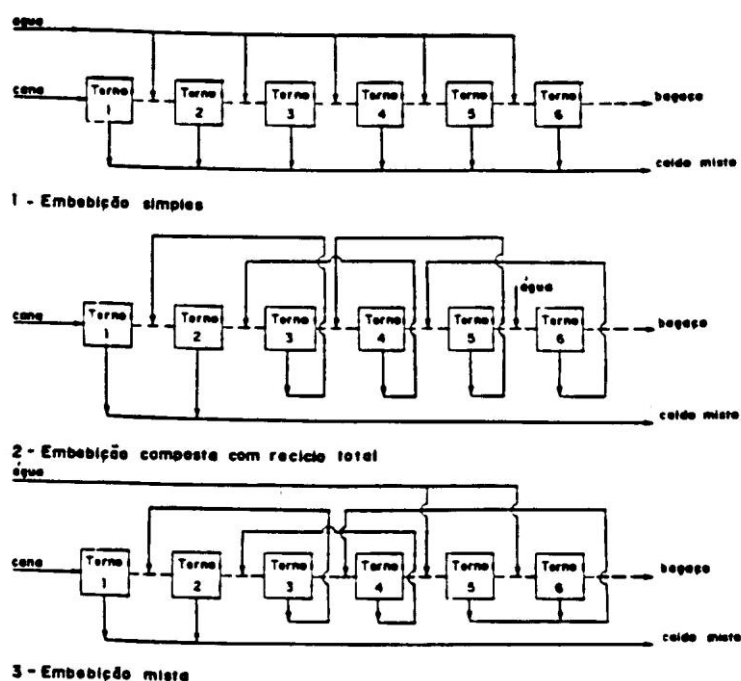


Figura 16. Esquema simplificado dos métodos de embebição aplicados na extração

A aplicação de embebição pode ser feita através de: calhas derramantes, bicos perfurados ou de canos perfurados (figuras 17,18 e19).

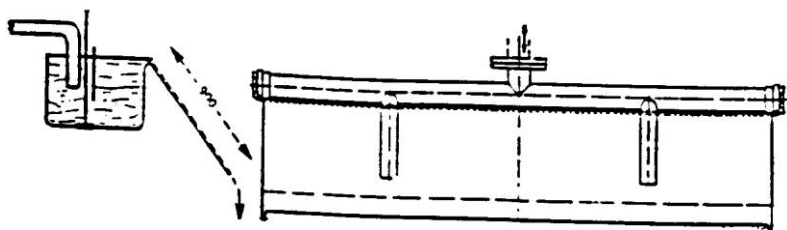


Figura 17. Embebição com caldo por calha derramante e chapa comprida

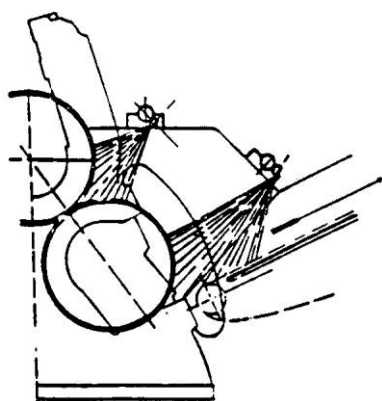


Figura 18. Embebição com bicos pulverizadores

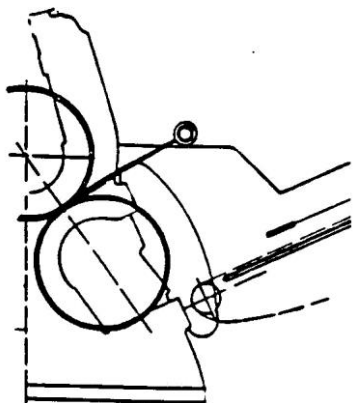


Figura 19. Embebição com tubos perfurados

### 5.1.2. Eficiência das moendas

A eficiência de um terno de moenda pode ser medida por dois parâmetros: capacidade e eficiência de extração.

Entende-se por capacidade de um terno de moagem a quantidade de cana moída por unidade de tempo. Ela pode ser expressa em TCH (tonelada de cana por hora) ou TFH (tonelada de fibra por hora).

Os fatores que afetam a capacidade de moagem são:

- a) preparo de cana;
- b) uniformidade de alimentação;
- c) fibra da cana;
- d) texturas das camisas;
- e) velocidade das moendas;
- f) automatismo do sistema de alimentação;
- g) regulagem da bagaceira;
- h) direção e elemento humano.

Entende-se por eficiência de extração, a quantidade de sacarose extraída da cana pelas moendas. Pode-se avaliar da seguinte forma:

- a) porcentagem de caldo misto extraído da massa de cana processada;
- b) porcentagem caldo extraído da massa de cana processada;
- c) sacarose (porcentagem de pol, extraída da sacarose presente na cana);
- d) sacarose perdida no bagaço por cento de fibra existente na cana.

Normalmente utiliza-se a relação entre sacarose extraída (no caldo misto) e sacarose da cana:

$$Ef (\%) = \frac{Pol(caldo) \times massa(caldo)}{Pol(cana) \times massa(cana)} \times 100$$

## 5.2. Extração do caldo por difusão

A “difusão” consiste em se conduzir a cana em aparelhos, conhecidos como difusores a fim de que a sacarose adsorvida ao material fibroso seja diluída e removida por lixiviação ou lavagem num processo em contra-corrente, que favorece a passagem do soluto (sacarose) de uma região de maior para outra de menor concentração.

A fim de reduzir a quantidade de água necessária, procede-se uma operação de retorno. Assim, ao final da operação, quando o bagaço se apresenta exaurido ao máximo, faz-se a lavagem com água fresca. O líquido obtido desta lavagem, contendo alguma sacarose que se conseguiu extrair do bagaço, é usado na lavagem anterior que é um pouco mais rico e, assim,

sucessivamente. Esse retorno pode ser efetuado de 5 a 20 vezes, dependendo do grau de esgotamento desejado.

A extração do caldo de cana pelos difusores é realizada pelo efeito combinado da difusão e da lixiviação, embora a participação da difusão seja considerada pequena e restrita aos tecidos fechados.

Com a utilização de difusores obtém-se eficiência de extração da ordem de 98%, contra os 96% conseguidos com a extração por moendas. O difusor opera com água em temperatura de 70°C, aumentando a velocidade de difusão e auxiliando na diminuição do número de microrganismos contaminantes. A calagem pode ser efetuada concomitantemente com a difusão, evitando-se assim a inversão da sacarose.

### 5.2.1 Tipos de difusores

a) difusores oblíquos(DDS) (figura 20)

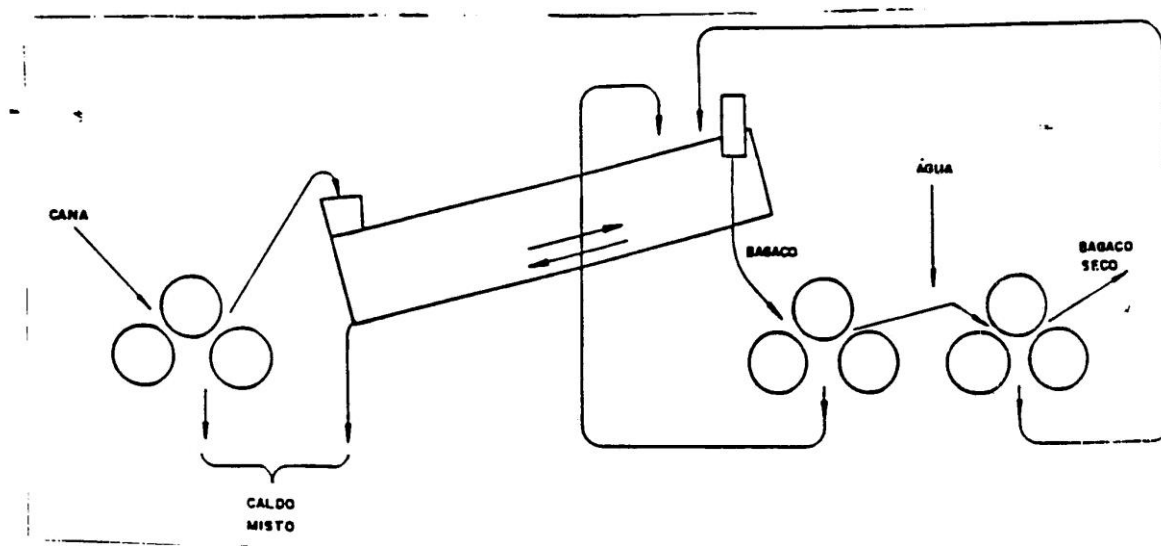


Figura 20. Esquema de difusor DDS

b) difusores horizontais (BMA e De Smet) (figura 21 e 22)



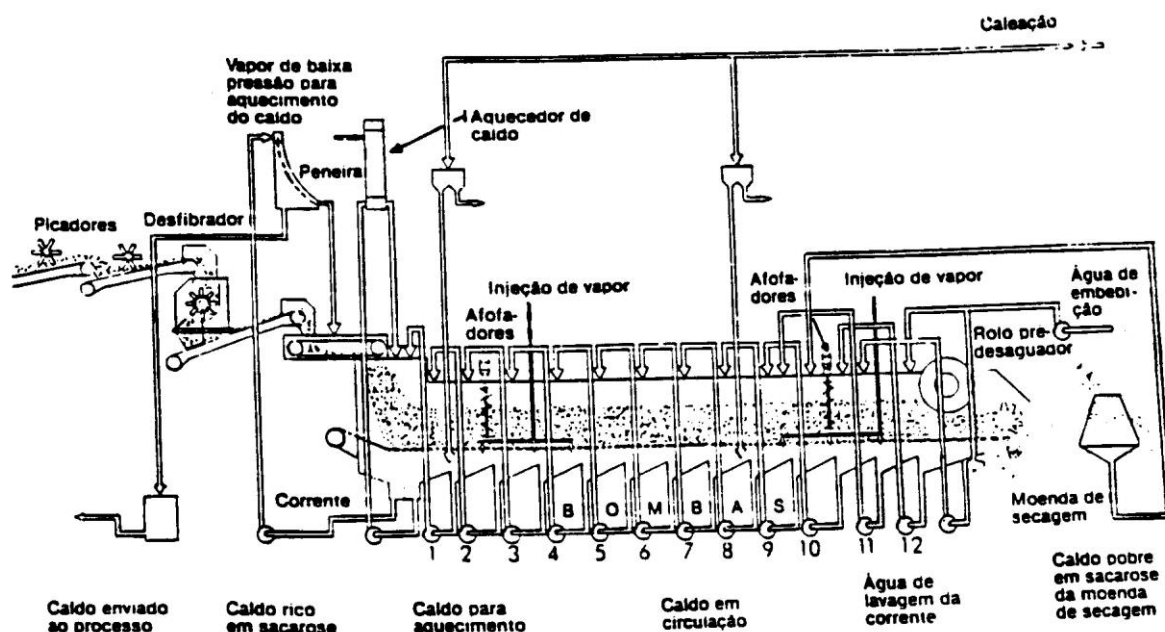


Figura 21. Fluxograma de difusor BMA

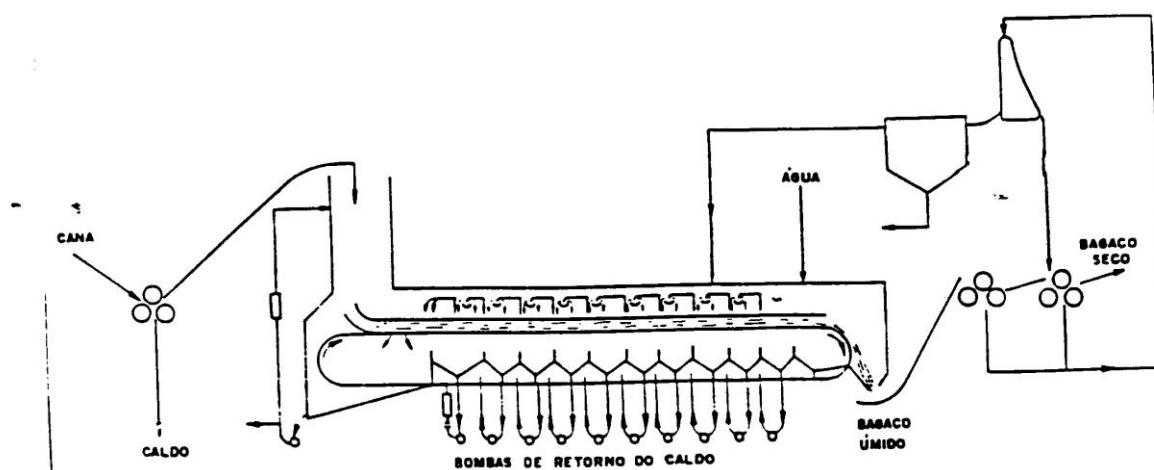


Figura 22. Esquema de difusor De Smet

c) difusores circulares (Silver e Suchen)

No Brasil é usado o horizontal.

A principal vantagem do difusor é a eficiência de extração que passa de 93-96% feito pelas moendas para 97-98% com o emprego do difusor.

Os difusores horizontais têm sido projetados para trabalhar apenas com cana desfibrada. São difusores longos (50-60 m) e realizam toda a extração possível da sacarose, restando praticamente bagaço.

Outras vantagens do difusor são:

- baixo custo de manutenção;
- obtenção de um bagaço com pol de 1 a 2%;
- baixo consumo de energia;
- obtenção de caldos mais puros;
- obtenção de alta extração de sacarose;
- menor desgaste.

A desvantagem é que carrega mais impurezas com o bagaço para as caldeiras exigindo maior limpeza das mesmas pela pior qualidade do bagaço.

## **6. PURIFICAÇÃO DO CALDO DE CANA: PENEIRAGEM E CLARIFICAÇÃO**

O caldo misto é uma solução diluída de sacarose que contem impurezas dissolvidas e em suspensão, representadas pelas impurezas sólidas (folhas, palha, solo...) e impurezas coloidais (não açúcares orgânicos como proteínas, ceras...). O objetivo da purificação é obter um líquido claro, límpido e brilhante, através da eliminação das impurezas, sem afetar a sacarose.

Os fatores responsáveis pelo teor de impurezas do caldo são:

- variedade e sanidade da cultura;
- tratos culturais;
- condições edafo-climáticas;
- sistema de corte e de carregamento;
- tempo entre queima e processamento e entre corte e processamento;
- sistema de extração, onde verifica-se maior teor de impurezas grosseiras na extração por moagem do que na extração por difusão.

A purificação do caldo consta de duas operações: peneiragem e clarificação. A primeira visa as impurezas grosseiras do caldo e a segunda, especialmente a eliminação das impurezas coloidais.

A clarificação do caldo em processamento fundamenta-se na coagulação máxima de seus colóides e na formação de um precipitado insolúvel que adsorva e arraste as impurezas, responsáveis pela sua natureza turva e opalescente.

A clarificação é executada considerando dois pontos importantes que são: a temperatura e mudança de reação do meio, pontos estes que devem ser conduzidos como final de reação para próximo da neutralidade.

Na figura 23 é mostrado um esquema geral de tratamento de caldo.

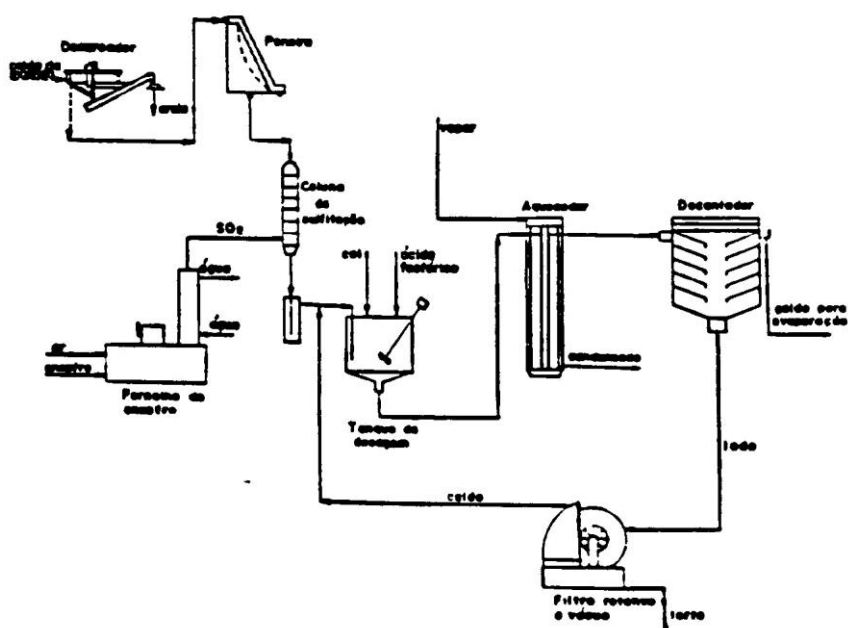


Figura 23 Esquema geral do tratamento de caldo misto para produção de açúcar

### 6.1.Peneiragem

O caldo misto extraído pelas moendas, possuindo entre 13 e 16 brix, começa a ser purificado já na saída da moenda, através de uma peneiragem no cush-cush, que tem a finalidade de remover as impurezas mais grosseiras contida no caldo, como pedaços de bagaço e cana.

Após a passagem do caldo pelo cush-cush, este é enviado por bombas centrífugas até as peneiras vibratórias ou estáticas, de malhas mais finas, com a finalidade de remover as impurezas grosseiras que passaram pelo cush-cush (bagacilho).

Este tipo de peneira vem sendo substituído por peneira rotativa, que possui menor área de exposição e, portanto, menor chance de contaminação microbiana.

A quantidade de impurezas grosseiras arrastadas no caldo é muito variável, dependendo do grau de preparo da cana, do assentamento da bagaceira, da variedade de cana, etc.

A presença de bagacilho durante a clarificação é indesejável, pois, além de produzir danos como entupimentos de canalizações, bombas, registros, etc, podem interferir na qualidade final do açúcar, por reações que ocorrem durante a clarificação.

O caldo proveniente desta primeira peneiragem, quer seja no “cush-cush” ou na peneira rotativa, pode sofrer uma segunda peneiragem auxiliar numa peneira de malha mais fina, tipo

DMS ou vibratória, o bagacilho retido retorna à primeira moenda do tandem, juntamente com as outras impurezas mais grosseiras separadas pelo “cush-cush” ou pela peneira rotativa, e o caldo misto peneirado segue para outros tratamentos do processo.

## **6.2. Clarificação**

No Brasil são utilizados dois processos de clarificação do caldo: a defecação simples e a sulfo-defecação, segundo o tipo de açúcar que se deseja produzir. Utiliza-se apenas a defecação simples quando se visa a produção de açúcar demerara (bruto) ou VHP (açúcar de polarização muito alta); já a sulfo-defecação é utilizada na fabricação de açúcar cristal branco.

### **6.2.1. Defecação simples ou caleagem**

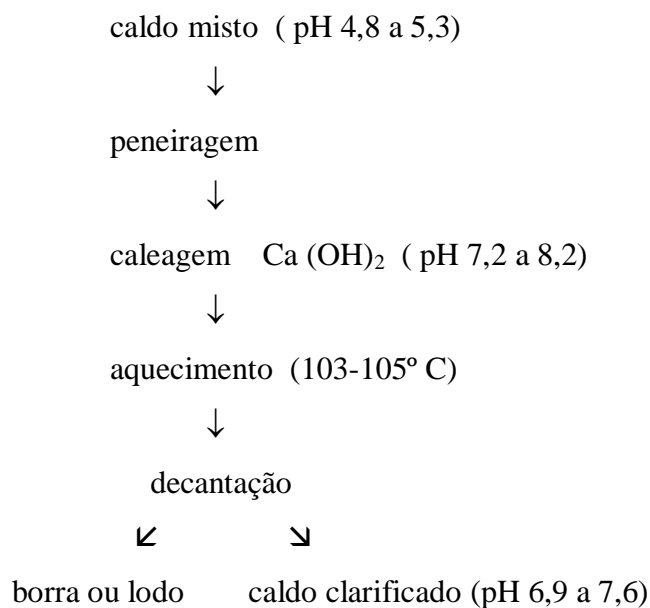
Processo usado na obtenção do açúcar cristal bruto ou demerara, utilizado como matéria-prima nas refinarias de açúcar.

O método baseia-se no emprego do hidróxido de cálcio (mudança de reação do meio), do aquecimento e, eventualmente, de fostato, bentonitas, polieletrólitos, que seriam coadjuvantes do processo.

O processo consiste em se adicionar ao caldo extraído pelas moendas, cujo pH varia de 4,8 a 5,3, o leite de cal – solução de hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) obtida pela hidratação da cal virgem ( $\text{CaO}$ ) em água - até obtenção de pH entre 7,2 a 8,2, atingindo o ponto isoelétrico das proteínas, fazendo com que elas floculem. Os íons  $\text{Ca}^{2+}$  formam ligações com as cargas negativas dos colóides, auxiliando a agregação destes em flocos.

A adição de leite de cal é feita em tanque de caleagem, sob agitação. A seguir, o caldo é enviado aos aquecedores, onde será aquecido até 105° C, no mínimo 103°C.

Esquema do processo de caleagem



A adição do leite de cal ao caldo misto é geralmente feita de maneira intermitente ou contínua.

A quantidade de leite de cal a ser adicionada ao caldo de cana varia de acordo com alguns fatores como: sistema de clarificação adotado, qualidade da cal e do caldo, tipo de açúcar a ser fabricado, etc.

Este leite de cal é adicionado ao caldo misto por um sistema de automação monitorado pelo pH da mistura.

### 6.2.2. Sulfo-defecação

Usado no Brasil para obtenção do açúcar cristal branco, baseia-se na utilização do enxofre, na forma de anidrido sulfuroso (gás  $\text{SO}_2$ ), como elemento acidificante e da cal, na forma de leite de cal (cal hidratada  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), como agente de neutralização.

A clarificação do caldo pelo processo de sulfitação, baseia-se na formação do sulfito de cálcio que é um sal pouco solúvel e precipita arrastando consigo o material coloidal, que posteriormente será removido do fluxo de fabricação.

O anidrido sulfuroso exerce diversas funções sobre o caldo: ação purificante, descorante dada pelo abaixamento do pH, neutralizante, fluidificante, preservativa, precipitativa e inversiva se desejável.

O processo consiste na passagem do caldo misto peneirado por uma coluna de formato cilíndrico com as extremidades tronco-cônicas, onde recebe o gás  $\text{SO}_2$  em contra-corrente, conferindo-lhe um pH variável entre 3,8 a 4,3.

O caldo assim sulfitado, de modo contínuo, é enviado às caixas de caleagem onde recebe o leite de cal, elevando o pH até um valor final de 7,2 a 8,2.

A obtenção do gás sulfuroso nas usinas é feita pela combustão do enxofre na presença do ar, em fornos queimadores que podem ser fixos ou rotativos, sendo os rotativos mais usados no Brasil (figura 24).

A utilização de  $\text{SO}_2$  na forma liquefeita já foi estudada e apresenta vantagens, como: maior grau de pureza, menor consumo de enxofre no processo, maior facilidade de controle, substitui os equipamentos convencionais de produção de gás. O fator limitante é a sua economicidade.

No Brasil, o consumo de enxofre por tonelada de cana fica entre 200 e 700g.

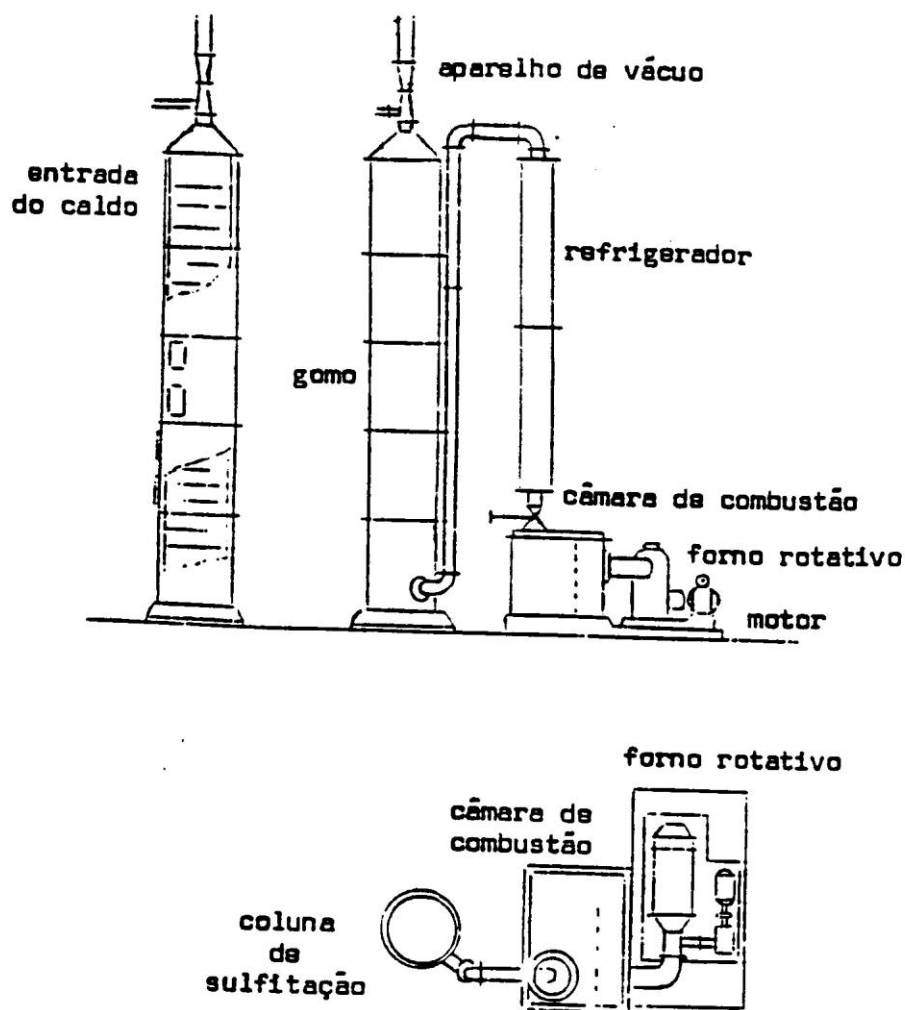


Figura 24. Conjunto sulfizador: forno rotativo e coluna

### 6.2.3. Produtos auxiliares da clarificação

A adição de ácido fosfórico ou outros produtos fosfatados ao caldo em tratamento, antes da decantação, constitui uma prática bastante difundida em usinas. O caldo misto para ser clarificado eficientemente deve conter no mínimo 0,3% de  $P_2O_5$ ; isto porque o precipitado de cálcio que se forma ao ser adicionado junto com a cal é de natureza floculante por aumentar o número de cargas negativas (pontes de ligação  $PO_4^{-3}$ ) e, quando em sedimentação, exerce papel de adsorvente, aprisionando e arrastando outros não-açúcares, contribuindo, portanto, para a obtenção de um caldo mais límpido, melhor clarificado.

A adição de compostos fosfatados, ou mesmo de outros auxiliares de clarificação, tipo polieletrólitos, tem sido praticamente devido aos seguintes fatores:

- necessidade de minimizar as dificuldades de clarificação, ocasionadas pela utilização de matérias-primas anormais, tais como canas brocadas, canas passadas ou então pobres em  $P_2O_5$  ;

- necessidade de se obter um caldo misto bem clarificado e que produza um açúcar final de bom valor comercial.

- aumentar a velocidade de decantação pelo aumento do tamanho dos flocos.

#### 6.2.4. Aquecimento do caldo

A operação de aquecimento consiste em se elevar a temperatura do caldo por volta de 103-105°C, a fim de que a floculação dos seus colóides se processe com maior rapidez dada pelo aumento do movimento browniano das partículas coloidais, e eficiência, uma vez que o calor é fator complementar da operação de clarificação do caldo, após o tratamento químico.

O aquecimento visa:

- desnaturar proteínas expondo um maior número de cargas negativas;

- expulsar gases dissolvidos;

- aumentar a velocidade de floculação;

- diminuir a viscosidade do meio, aumentando assim a velocidade de decantação.

O efeito do tamanho do floco e da viscosidade do caldo na velocidade de decantação (sedimentação) pode ser observado pela Lei de Stokes:

$$V_s = \frac{\phi^2 x (\rho_s - \rho_c)}{18\mu_c} xg$$

Onde:  $V_s$  = velocidade de sedimentação;

$\phi$  = diâmetro da partícula;

$\rho_s$  e  $\rho_c$  = peso específico da partícula e do meio, respectivamente;

$\mu_c$  = viscosidade do meio.

$g$  = aceleração da gravidade.

A operação é realizada em aquecedores horizontais ou verticais, que são formados por uma calândria tubular, onde o caldo circula nestes tubos e o vapor em volta. Os cabeçais possuem paredes que obrigam o caldo a passar um certo número de vezes de cima para baixo e de baixo para cima, seguindo em cada vez por uma parte diferente dos tubos da calândria, garantindo a troca de calor com o vapor em contra-corrente (figuras 25 e 26).



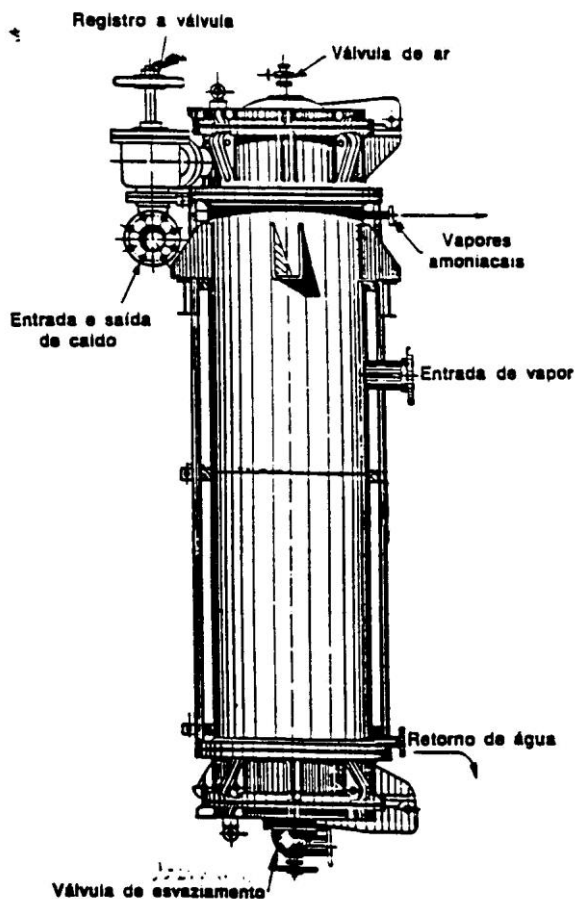


Figura 25. Aquecedor

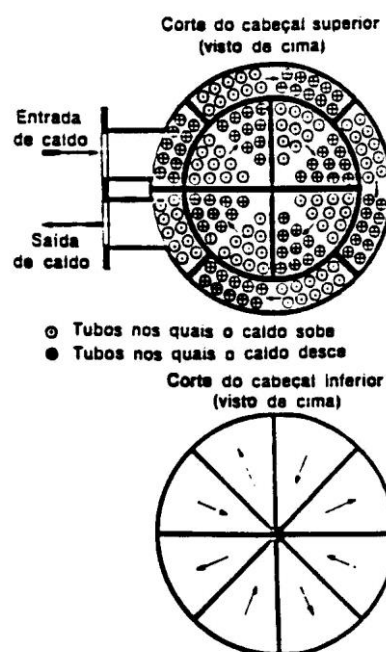


Figura 26. Circulação do caldo num aquecedor

### 6.2.5. Decantação do caldo

Após sofrer os tratamentos químicos e térmicos, o caldo de cana é posto em repouso, para se realizar a remoção das impurezas, por floculação e posterior sedimentação e flotação dos colóides menos densos que o caldo.

O objetivo da decantação é permitir a separação gravimétrica dos colóides, obtendo-se a separação numa mistura heterogênea de 3 fases, onde a fase superior compreende as impurezas menos densas (flotadas), a intermediária o caldo clarificado e a inferior as impurezas mais densas (decantadas).

A decantação pode ser intermitente ou contínua. Atualmente emprega-se mais a contínua devido a uma série de inconvenientes da intermitente.

Na decantação contínua, os decantadores recebem continuamente um fluxo de caldo tratado, oriundo dos aquecedores. A forma de construção desses equipamentos permitem a separação do caldo em duas frações: caldo clarificado e borras ou lodo.

O decantador deve ser suficientemente grande para que a velocidade de escoamento e de circulação do caldo seja lenta o bastante para permitir a decantação. Esta baixa vazão é conseguida pela grande área que suas bandejas proporcionam (ilustração de um decantador na figura 27).

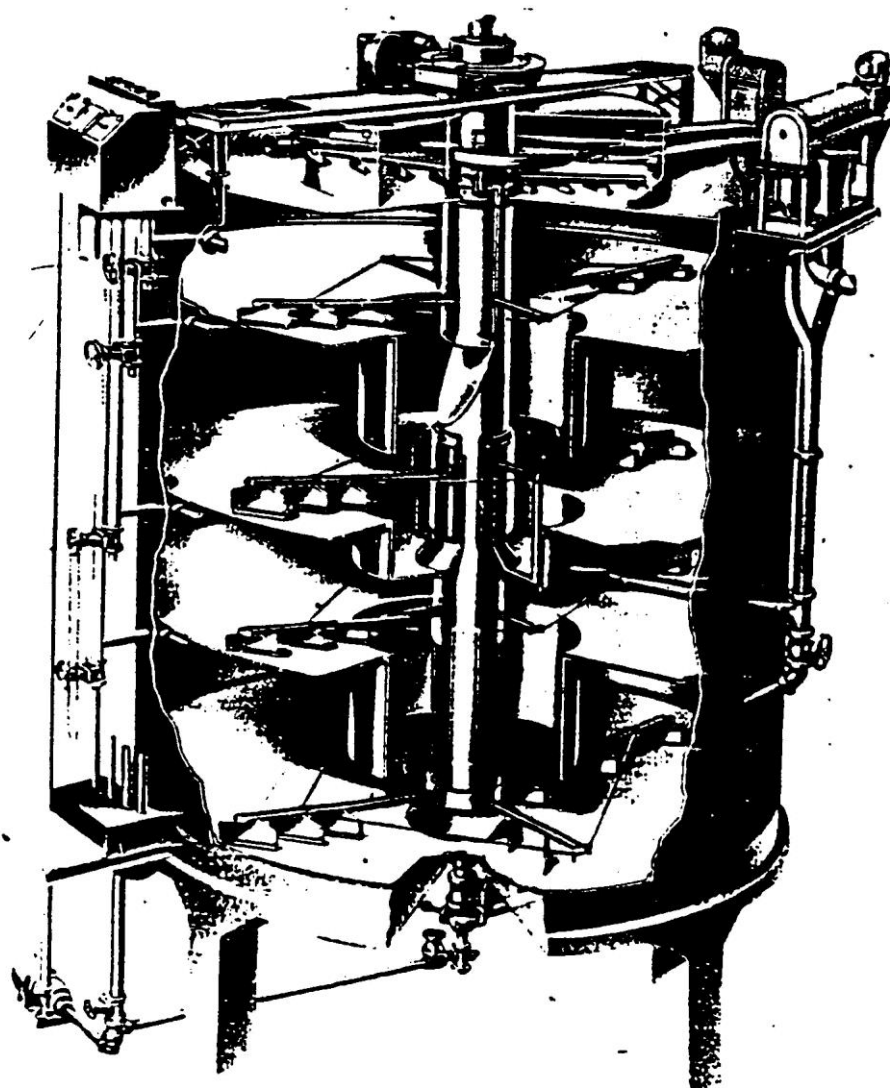


Figura 27. Decantador Rapidorr

O caldo livre das impurezas é conduzido à parte superior de maneira regular e contínua, e o lodo à parte inferior.

#### **6.2.5.1. Funcionamento de um decantador**

O caldo tratado e aquecido (103-105°C) é enviado sob pressão ao decantador passando antes pelo balão de “flash”. No balão de “flash” ocorrerá uma expansão à pressão atmosférica, o qual provoca a liberação de um fluxo de vapor juntamente com o ar presente no caldo. Em outras palavras, o caldo perde velocidade e sofre uma auto-ebulição.

Deste aparelho, o caldo flui lentamente para o decantador, entrando através de uma tubulação, na câmara de coagulação.

O decantador trabalha sempre cheio, pois o sistema de retirada de caldo e de borras (lodo) baseia-se no princípio de vasos comunicantes.

As impurezas de menor densidade que o caldo, sobrenadam, e são conduzidas pelos raspadores horizontais até a calha de descarga e desta, para a caixa de borras.

As impurezas de maior densidade depositam-se sobre as bandejas, sendo retiradas pelos raspadores, que giram de 10 a 12 rph. As borras, que tem maior densidade que o caldo, descem pelo espaço central existente entre as bandejas, até a câmara de borras.

Na câmara de concentração, as borras são conduzidas através de um sistema de vasos comunicantes, ou por bomba de diafragma ou engrenagens, até a caixa de borras onde, reúnem-se, com as de menor densidade já separadas e são enviadas ao depósito. As borras arrastam cerca de 5% de caldo bruto, que será posteriormente removido por filtração à vácuo.

O caldo claro decantado sai logo abaixo de cada bandeja e vai para a caixa de prova, também pelo princípio de vasos comunicantes.

Na caixa de prova tem-se uma válvula correspondente à cada bandeja. O funcionamento desta válvula é por um sistema telescópico que faz baixar ou levantar a abertura de saída de caldo em relação ao nível deste no aparelho. Este sistema de decantação contínua permite que se tenha o controle de entrada do caldo, saída de caldo clarificado e de borras.

A capacidade do decantador depende do teor de impurezas do caldo, da qualidade dos tratamentos de sulfo-defecação e do uso de auxiliares de clarificação.

#### **6.2.6. Filtração das borras**

A operação de filtração visa recuperar o caldo arrastado com as borras ou lodo, o qual tem considerável teor de sacarose (cerca de 2% da sacarose da cana moída).

Antigamente a filtração era feita em filtros prensa, onde a mistura de caldo e material precipitado era forçada contra um conjunto de superfícies filtrantes, nas quais as borras ficavam retidas e o caldo claro filtrado fluía. Modernamente esta operação é feita em filtros rotativos à vácuo (figura 28).

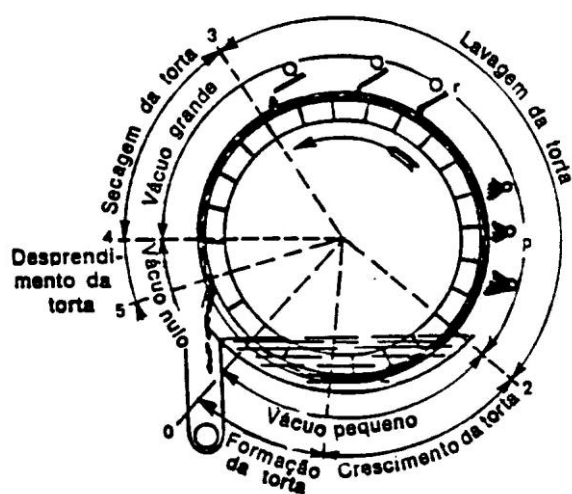


Figura 28. Esquema de funcionamento de um filtro rotativo contínuo à vácuo

O caldo extraído do lodo retorna ao processo de clarificação, devido à sua maior contaminação. O lodo filtrado, denominado de torta de filtro, consiste num adubo orgânico que é enviado à lavoura.

### 6.3. Consequências da purificação

Além da eliminação de impurezas, objetivo principal da purificação do caldo, consegue-se benefícios adicionais, tais como:

- Redução do risco de inversão da sacarose, pelas condições de pH alto em que o caldo se encontra;
- redução da destruição dos açúcares redutores, também pelas condições de pH, a qual produz substâncias que conferem cor ao açúcar e aumentam o teor de melão;
- redução dos teores de sais solubilizados, por serem melacigênicos;

- redução da manutenção dos equipamentos e tubulações pela menor formação de incrustações.

## **7. EVAPORAÇÃO DO CALDO**

O caldo clarificado que flui para os evaporadores é uma solução diluída de sacarose de 13 a 16 brix e que apresenta uma temperatura variável entre 95 - 98 °C.

A remoção da maior parte da água deste caldo (83 a 86%) constitui o objetivo principal da evaporação.

Nas usinas, a concentração do caldo clarificado até a fase da cristalização de sua sacarose é realizada por razões de ordem técnica e econômica, em dois estágios:

a) 1º estágio: compreende a concentração do caldo clarificado em evaporadores de múltiplos-efeitos até a obtenção de um líquido denso, de cor marrom, denominado xarope e que não mostra nenhum sinal de sacarose cristalizada. Sua concentração é variável de 55 a 65 brix.

b) 2º estágio : compreende a concentração do xarope, em evaporadores de simples efeito até a condição de massa cozida, produto este constituído de cristais de sacarose e de mel, possuindo aproximadamente 90 brix. Este segundo estágio é conhecido por cozimento.

### **7.1. Princípios da evaporação**

As bases da evaporação do caldo clarificado em aparelhos de múltiplos efeitos, estão alicerçados em três princípios básicos, destacando-se em importância o primeiro que diz:

“Em um múltiplo efeito, cada quilograma de vapor usado no primeiro vaso, evaporará tantos quilogramas de água quantos forem os vasos”.

Diante deste princípio, tem-se: num simples-efeito, um quilograma de vapor evapora um quilograma de água. Num duplo efeito: 1 Kg de vapor evapora 2 Kg de água, etc. Portanto, 1 Kg de vapor evaporará  $n$  Kg de água, onde  $n$  é o número de vasos evaporadores. Verifica-se que, por este princípio, o consumo de vapor se restringe apenas ao primeiro vaso e que quanto maior for o número de vasos, mais econômica será a operação. Mas por questões de ordem econômica e técnica, a evaporação se restringe à utilização de 3 a 5 vasos (quanto maior nº de vasos, maior custo de equipamentos, dificuldades no controle da operação, etc).

O segundo princípio diz respeito à utilização do vapor efluente (vapor vegetal) de qualquer dos vasos de múltiplo efeito em outros setores da fábrica, o que representa uma

economia do sistema. O terceiro, refere-se a necessidade de se extrair continuamente das calândrias, os vapores incondensáveis que são prejudiciais à evaporação.

## 7.2. Evaporação em Múltiplo-Efeito

A evaporação do caldo realizada em apenas um aparelho (vaso) é a de simples-efeito. Os gases resultantes dessa operação vão diretamente ao condensador. Este caso é usado nas operações de cozimento.

No múltiplo efeito, quando o vapor do 1º corpo é encaminhado a um 2º vaso, tem-se um duplo efeito; o vapor deste para o aquecimento do 3º, tem-se o tríplice-efeito. E assim, um quádruplo-efeito, um quántuplo-efeito, se forem aproveitar os vapores resultantes da ebulição do caldo do vaso anterior. O vapor do último irá sempre para o condensador.

Atualmente usa-se um pré-evaporador, o que nada mais é do que um 1º vaso de evaporação, diferenciado dos demais pelo seu tamanho.

O caldo entra no pré-evaporador com cerca de 13 brix aproximadamente e sai com 20-25 brix, seguindo daí para o 1º vaso propriamente do quádruplo-efeito. Este conjunto funciona como um quántuplo-efeito.

O funcionamento deste conjunto obedece ao seguinte esquema: o caldo clarificado flui do decantador e é encaminhado a uma caixa que tem a incumbência de alimentar continuamente, através de bomba, o 1º vaso do múltiplo efeito (pré ou 1º vaso do quádruplo-efeito). O aquecimento deste primeiro vaso evaporador é feito com vapor de escape das turbinas. Os vapores resultantes deste 1º vaso, para o caso do pré, seguem para um balão situado do lado do aparelho conhecido como balão de vapor vegetal. O vapor deste balão alimenta posteriormente os cozedores, o 1º vaso do quádruplo-efeito, e os aquecedores. No caso de se ter apenas um quádruplo-efeito, os vapores do 1º vaso vão, através de um tubo de grosso diâmetro, para à calândria do 2º vaso, fazendo ferver o caldo nele contido, originário do 1º vaso. Os gases deste 2º vaso são encaminhados à calândria do 3º vaso, fervendo aí o caldo originário do 2º vaso. O processo se repete, até que se tem no último vaso o caldo originário do penúltimo. Os gases deste último vaso vão para o condensador onde, condensando-se, transformam-se em água quente, numa temperatura de 50-55 °C (figura 29).

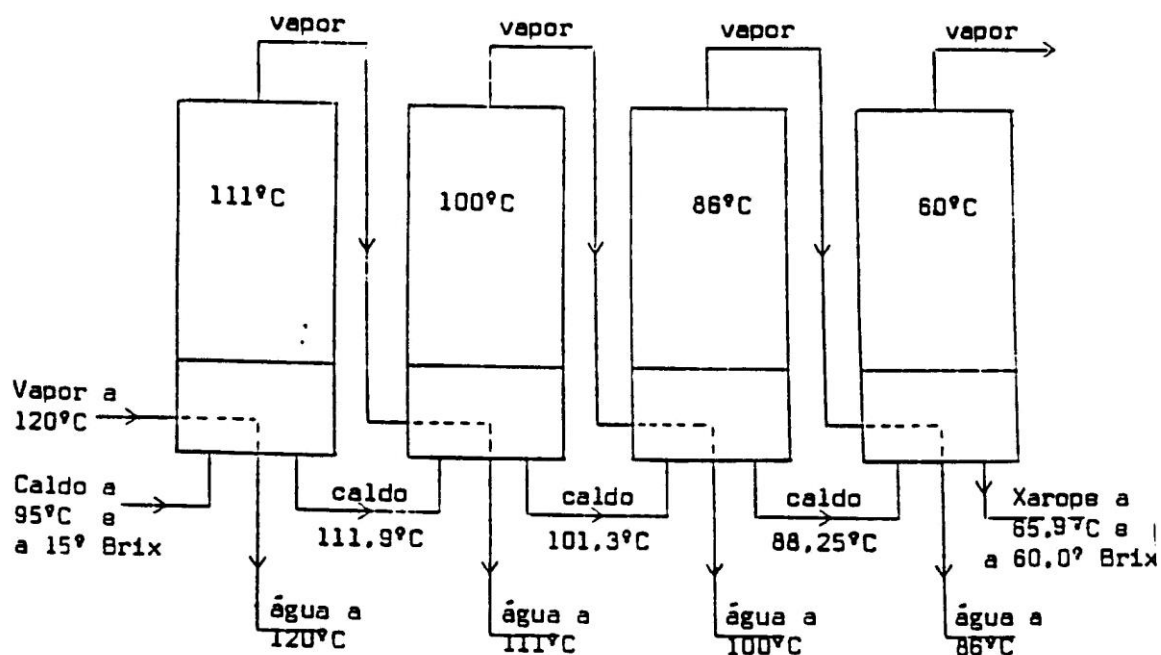


Figura 29. Dados relativos de funcionamento de um quadrúple-efeito

Os gases do último vaso, sendo condensados, criam uma condição de vácuo neste vaso. Este vácuo ou vazio é, assim, produzido por um condensador multijato ou por um condensador simples e bomba de vácuo. O vazio no vaso anterior ao último é produzido pela condensação e retirada de seus gases na câmara de aquecimento do vaso que alimenta. O mesmo fenômeno se repete para o 2º vaso. Para o caso do 1º vaso não se tem vazio, pois, é fervido com vapor de escape. Percebe-se que o conjunto trabalha sob condições decrescentes de pressão, considerando do 1º ao último vaso. Com esta diminuição de pressão, consegue-se a diminuição da temperatura de ebulição do caldo em evaporação, permitindo a utilização do vapor vegetal que possui temperatura igual ou inferior à 100 °C, e ainda a menor formação de substâncias corantes. O caldo passa, em consequência das diferenças de pressão, de vaso a vaso, até sair na condição de xarope no último vaso (figura 30).

Para a retirada da água condensada nas calândrias é necessário um rebaixamento de pressão externa, conseguido por uma tubulação de escoamento de condensado com 11m de altura d'água, obrigando o posicionamento do conjunto evaporador à esta altura, pelo menos.

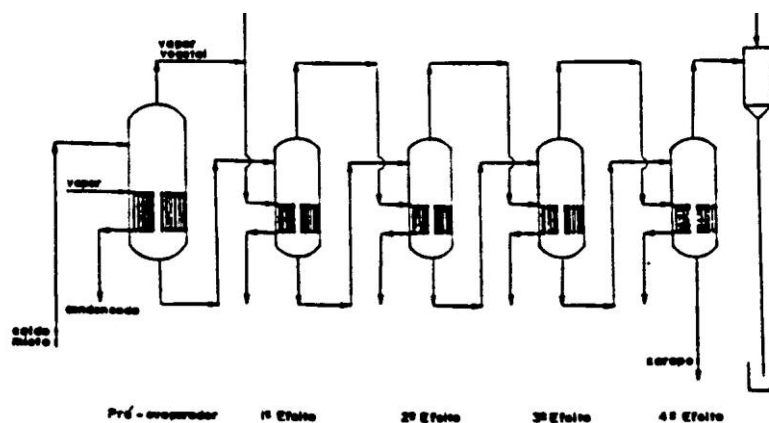


Figura 30. Fluxograma simplificado do sistema de evaporação em múltiplo efeito

Os corpos de um evaporador em múltiplo-efeito são essencialmente iguais em construção, especialmente, em relação a altura, diâmetro e superfície tubular.

Geralmente, são cilíndricos e construídos em chapas de aço carbono. A altura é pouco superior ao dobro do diâmetro. Basicamente, as suas partes mais importantes são constituídas por calândria e câmara da evaporação. É fechado superiormente pelo domo e pelo vaso de segurança e inferiormente pelo fundo. Terá como acessórios: manômetros, termômetros, lunetas, quebra-vácuo, etc. (figura 31).



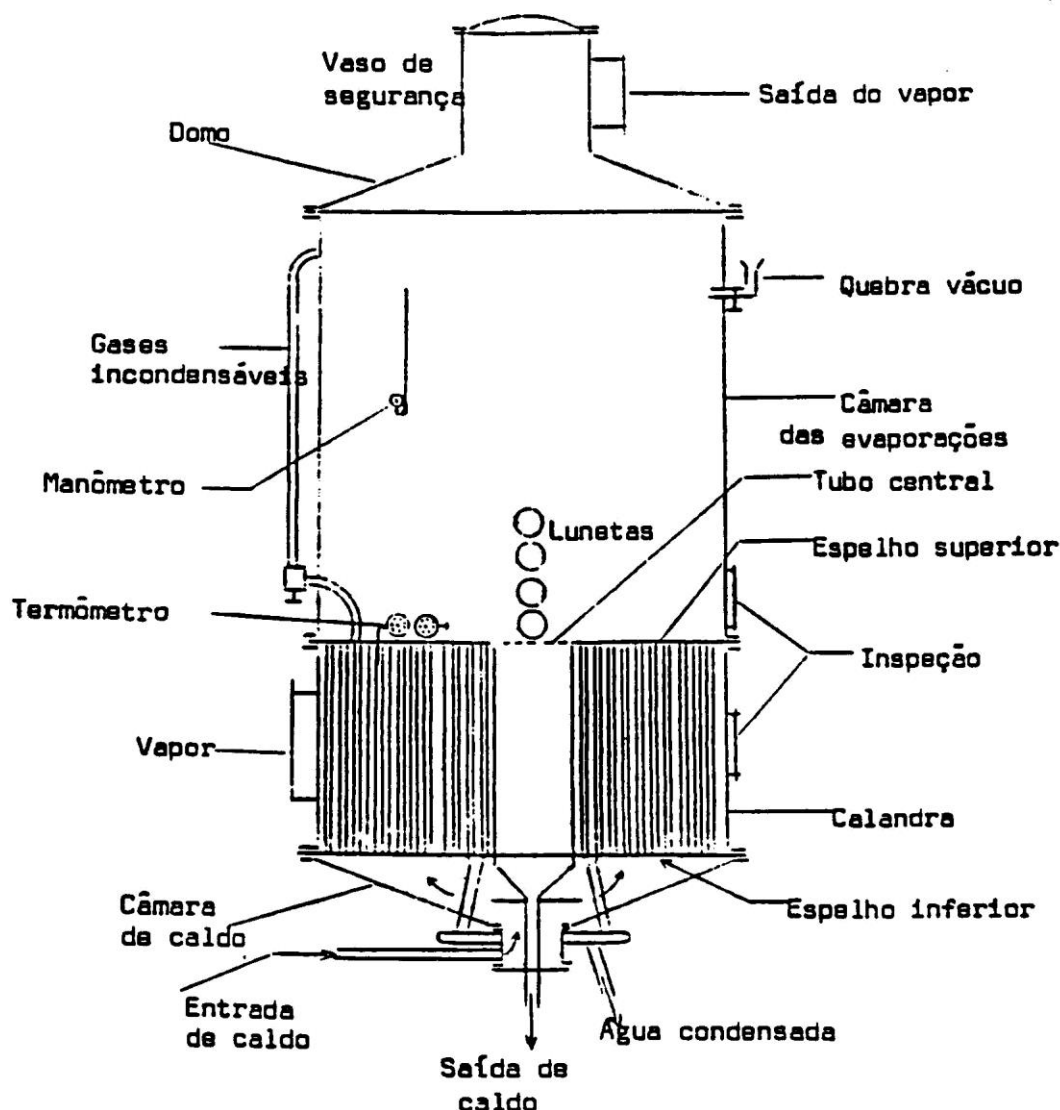


Figura 31. Detalhes de um vaso evaporador

## 8. COZIMENTO

O xarope, material que flui dos evaporadores em múltiplos-efeitos, tem uma concentração variável de 50-60° Brix. O xarope é bombeado do último vaso de evaporação para uma caixa metálica, situada próximo dos evaporadores e cozedores.

No cozimento, a concentração do xarope e obtenção dos cristais são feitas em 2 fases:

a) fase inicial: formação dos cristais de sacarose. Esta fase é conhecida por nucleação, pé de cozimento ou granagem.

b) fase final: crescimento dos cristais. Os cristais crescem de tamanho pela deposição de sacarose nos núcleos inicialmente formados.

O produto final formado é a massa cozida, formada de cristais de sacarose e mel. A massa cozida pode apresentar diversos graus de pureza, conforme a proporção, natureza em sacarose nos xaropes e nos méis.

O cozimento é efetuado em aparelhos de simples-efeito, conhecidos por cozedores, vácuos ou tachos.

A massa cozida é semi-sólida, viscosa e que pode ser trabalhada apenas em aparelhos cujos tubos de circulação de massa sejam de 3" a 4" .

Os vapores dos cozedores, resultantes da concentração do xarope, vão diretamente para os condensadores.

Os cozedores operam de maneira intermitente, sob alto vácuo e baixa temperatura. Exigem trabalho cuidadoso e supervisão constante.

Nos cozedores, os elementos de aquecimento são os que caracterizam o tipo de aparelho. Portanto, tem-se cozedores de:

- serpentina;
- calândria (figura 32 e 33);
- mistos;
- placas (figura 34 e 35).

O mais utilizado no Brasil é o aquecimento por calândria, mas tem sido crescente a utilização do cozimento por placas.

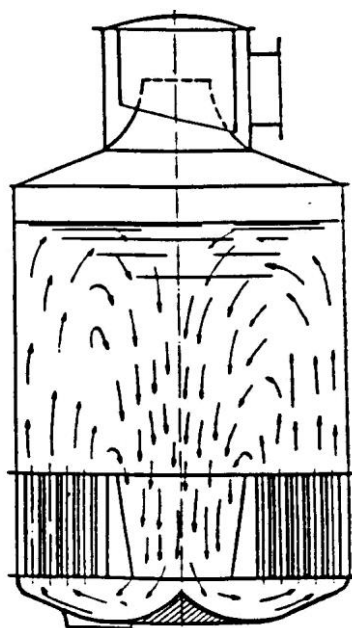


Figura 32. Circulação de massa cozida num cozedor com calândria fixa

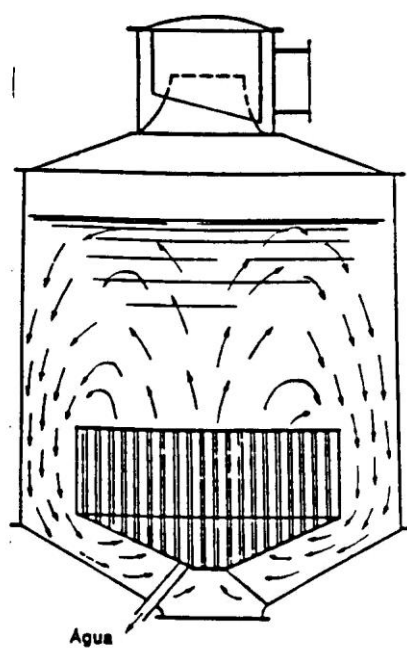


Figura 33. Circulação da massa cozida num cozedor com calândria flutuante

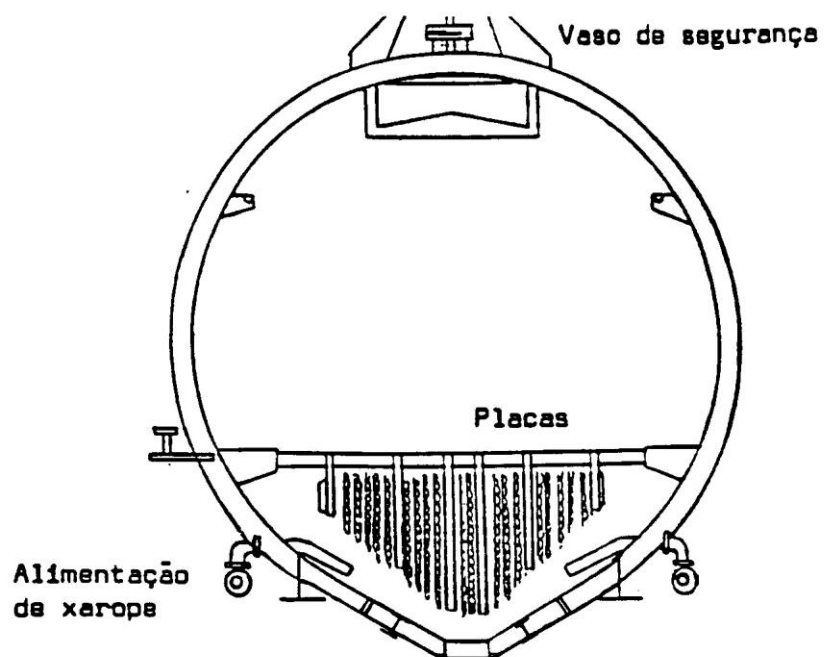


Figura 34. Cozedor horizontal com elementos de aquecimento em placas

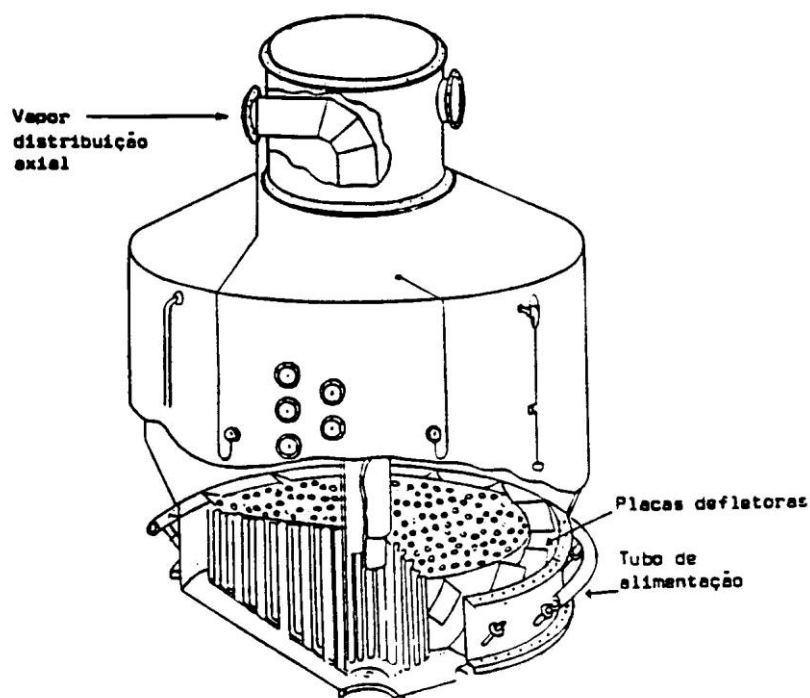


Figura 36. Cozedor Segura de alta velocidade

### 8.1. Descrição de um cozedor clássico

Um cozedor é um vaso de simples-efeito, muito semelhante a um corpo de evaporação em múltiplos-efeitos.

As diferenças essenciais entre um cozedor e um evaporador dizem respeito a forma do fundo do vaso, as dimensões dos tubos de aquecimento e de circulação de massa cozida, as condições de pressão e temperatura de trabalho e a forma de operação.

A configuração do fundo do cozedor é determinada de tal forma a favorecer a circulação da massa cozida que é viscosa e espessa. A abertura da saída da massa na parte inferior é de grande diâmetro o que facilitará o seu rápido escoamento.

O cozedor é construído em chapas de aço carbono, possuindo em sua parte superior o domo e o vaso de segurança por onde saem os gases para o condensador (figura 36).

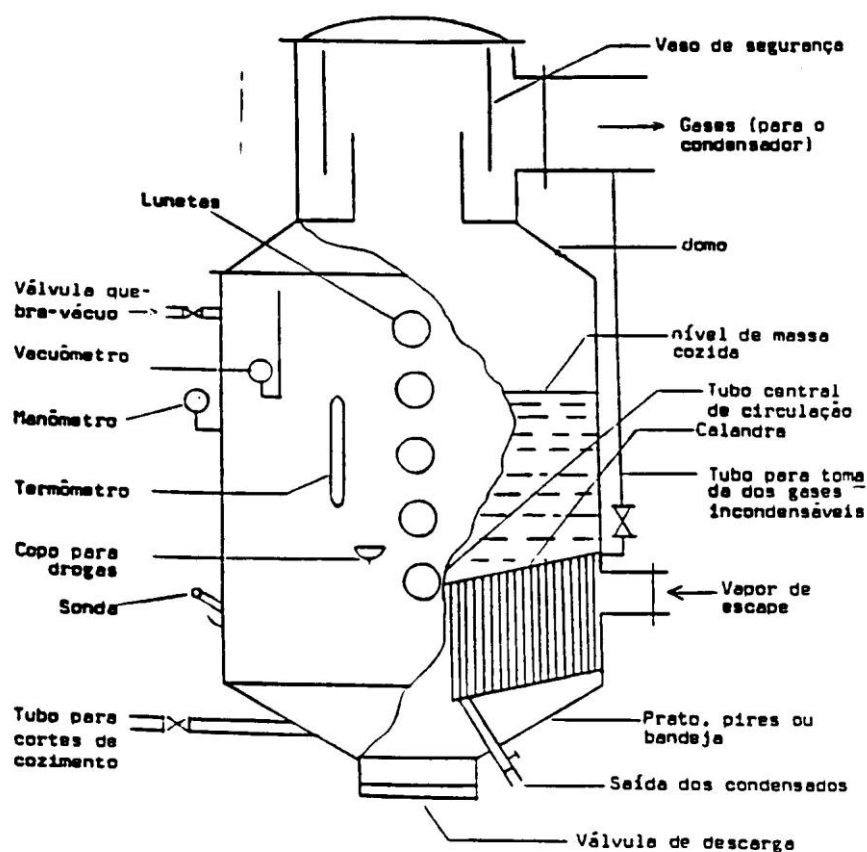


Figura 36. Cozedor de calândria com todas as suas partes

## 8.2. Condução de um cozimento

O cozimento compreende a formação inicial do cristal e o seu crescimento (figura 37).

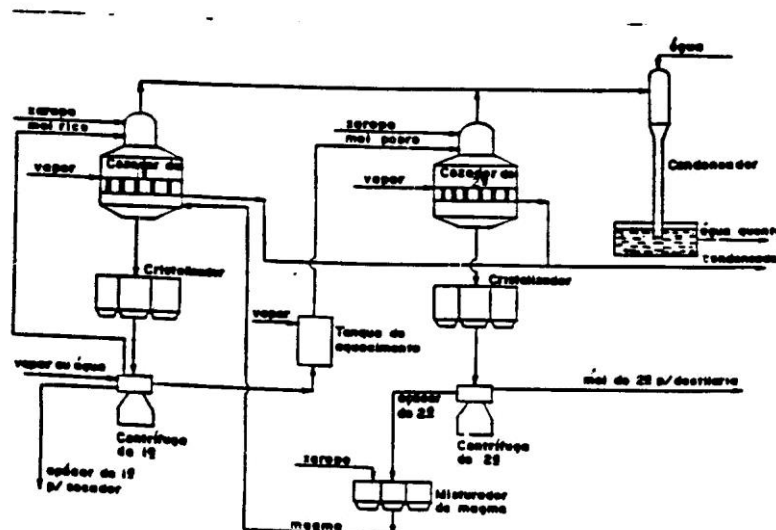


Figura 37. Fluxograma simplificado da operação de cozimento

Em geral, se processa pelas seguintes etapas:

a) concentração inicial: para iniciar o cozimento, o operador põe em funcionamento o sistema de vácuo do aparelho através do condensador e ejetor à vapor, condensador e bomba de vácuo ou simplesmente o seu multijato.

Essa diminuição de pressão “aspira” o xarope até cobrir a superfície superior da calândria. Após esta alimentação, o operador abre a válvula de vapor e regula a pressão para 650 mm Hg (+/- 25”) que vai permitir uma temperatura em torno de 65 °C. Nesta condição de pressão, o xarope vai se concentrar pela perda de água. Para compensar esta evaporação, o cozedor é alimentado com mais xarope em filetes contínuos e apenas o suficiente.

O número de cristais é função da quantidade de xarope aspirado:

- pouco xarope implicará num menor pé de cozimento
- muito xarope implicará num maior pé de cozimento, isto é, surgirão muitos cristais de sacarose.

b) formação dos cristais de sacarose

Os métodos utilizados na formação dos cristais de sacarose mais conhecidos são os seguintes: espera, choque e semente.

- Método da espera

Por este processo, o cozinhador vai concentrando o xarope até o aparecimento espontâneo dos cristais de sacarose.

A solução vai atingindo a condição de supersaturação e esta condição é reconhecida:

- por meio de aparelhos de controle: do índice de refração, da elevação da temperatura, da pureza, etc.

- por meio de observação visual da velocidade de escorrimento do xarope no vidro da luneta

- pela consistência e viscosidade do material, quando observado pelo tato. Nesta condição, quando o fio do xarope concentrado mantido entre os dedos não se romper, tem-se uma solução super-saturada e haverá formação espontânea dos cristais de sacarose.

A observação do número de cristais formados pode ser feita em vidro transparente onde se coloca uma amostra do material retido pela sonda.

- Método de choque

A cristalização é obtida sob condições de temperatura mais elevada (75° C) e sob baixo vácuo (+ - 24" ).

Após a concentração do xarope até um certo grau, verificado pelo uso dos métodos já mencionados, diminui-se bruscamente a pressão. Com esta diminuição haverá uma forte ebulição e a temperatura cai bruscamente. Com isso, a zona lábil é atingida e a cristalização da sacarose se processa espontaneamente.

-Método da semente

Trata-se do método que permite um melhor controle do número e tamanho dos cristais, e por isso é o mais utilizado. Uma certa quantidade de açúcar finamente moído em suspensão em álcool (semente) é adicionada ao cozedor que recebeu xarope inicialmente e sofreu concentração. A concentração deste xarope deve ser mantido na zona metaestável. O coeficiente da supersaturação varia de 1,1 a 1,2.

Após a alimentação do pó de açúcar, fecha-se o vapor e a alimentação de xarope por 15-20 minutos para evitar dissolução dos cristais. Haverá apenas crescimento dos cristais por deposição. Os cristais crescem em tamanho e não em número.

c) Crescimento dos cristais e levantamento do cozimento

O crescimento dos cristais, uma vez obtidos, deve ser levado dentro das condições da zona metaestável. Uma alimentação gradual e lenta é feita com xarope, mel rico ou mel pobre.

Esta alimentação é função da pureza que se quer obter. Usando mel pobre, a massa cozida final será mais pobre.

O controle do cozimento é feito observando as lunetas que vão se cobrindo de massa. O nível de massa cozida nos cozedores pode chegar a vários centímetros acima da calândria, diferenciando-se do comportamento dos evaporadores.

#### d) Concentração Final

A massa cozida antes de ser descarregada deve sofrer o máximo de concentração. Esta concentração é conhecida como “aperto”.

Esta operação é de difícil realização, pois tem-se que evaporar água quando a circulação da massa cozida é muito difícil pela alta viscosidade da massa.

#### e) Descarregamento

Após o aperto final da massa, corta-se o vapor, fecha-se o sistema de vácuo, abre-se a válvula quebra-vácuo e abre-se a válvula de descarga, sendo a massa encaminhada através de canaletas aos cristalizadores.

Encerrando-se o cozimento lava-se o cozedor e descarrega-se a água doce para o tanque de mel, o qual é novamente aquecido para dissolver possíveis cristais de sacarose.

### 8.3. Solubilidade

A sacarose é altamente solúvel em água. Esta solubilidade, entretanto, sofre influência dos sais minerais e do açúcar invertido. De modo geral, os sais minerais tendem a aumentar a solubilidade da sacarose, enquanto o açúcar invertido promove a sua diminuição.

Quando a temperatura e a proporção de água são mantidas constantes, uma solução de sacarose estará dentro de uma das 3 condições seguintes:

#### a) solução instável; diluída ou não saturada

Nesta solução, considera-se uma certa proporção de sacarose em água. Pela adição sucessiva de mais sacarose, faz com que esta solução adquira outra concentração e sem perder a condição de diluída.



b) solução estável ou saturada

Pela adição sucessiva de sacarose numa solução se atingirá, depois de certo tempo, uma condição em que a solução perderá a propriedade de dissolver mais sacarose. A solução não dissolve mais açúcar e é dita saturada.

c) solução instável ou supersaturada

A solução de sacarose é supersaturada quando mostra uma concentração superior a que tinha antes, sem que haja formação ou crescimento de cristais. Na prática, é conseguida por resfriamento ou evaporação das soluções saturadas.

### 8.3.1. Coeficiente de Supersaturação

O coeficiente de supersaturação expressa a relação entre a massa de sacarose diluída em 100 partes de água de uma solução supersaturada e o massa de sacarose dissolvida em 100 partes de água de uma solução saturada , ou seja:

$$C.S.S = \frac{S'}{S''}$$

onde;

CSS = coeficiente de supersaturação

S' = massa de sacarose dissolvida em 100 partes de água de uma solução supersaturada, de pureza R e a temperatura t ° C.

S'' = massa de sacarose diluída em 100 partes de água de uma solução saturada de pureza 100 e a temperatura t° C.

Para uma melhor caracterização, tem-se que:

CSS = 1 - solução saturada

CSS < 1 - solução diluída

CSS > 1 - solução supersaturada

### 8.3.2. Zonas de Supersaturação

Em uma solução não se formam e nem crescem cristais de sacarose a menos que se leve a mesma à condição de supersaturação.

Na fabricação do açúcar, esta condição de supersaturação que permite a nucleação e o crescimento dos cristais de sacarose ocorre sempre depois da concentração progressiva de certa quantidade de xarope ou magma ou de açúcar de segunda, refundindo nos cozedores.

Na prática industrial, a nucleação ocorre quando o CSS esta entre 1,1-1,5.

As três zonas de supersaturação em que esta baseado o andamento de um cozimento são as seguintes (figura 38):

a) zona metaestável

É a zona que mais se aproxima da linha de saturação da sacarose. Os seus limites são: 1,1 a 1,3.

Nesta faixa ocorre:

- crescimento dos cristais existentes
- não mais formação de cristais
- tendência para o limite inferior (saturação)

b) zona intermediária

Pode ocorrer a formação de novos cristais, porém somente na presença de cristais existentes.

Esta zona é contestada por alguns autores.

A zona intermediária, se realmente existe é tão reduzida que não apresenta nenhuma importância, na prática.

c) zona lábil

O CSS esta normalmente acima de 1,3 e pode chegar a 1,5.

Nesta zona ocorre:

- nucleação espontânea
- tendência para limite inferior
- crescimento de cristais existentes



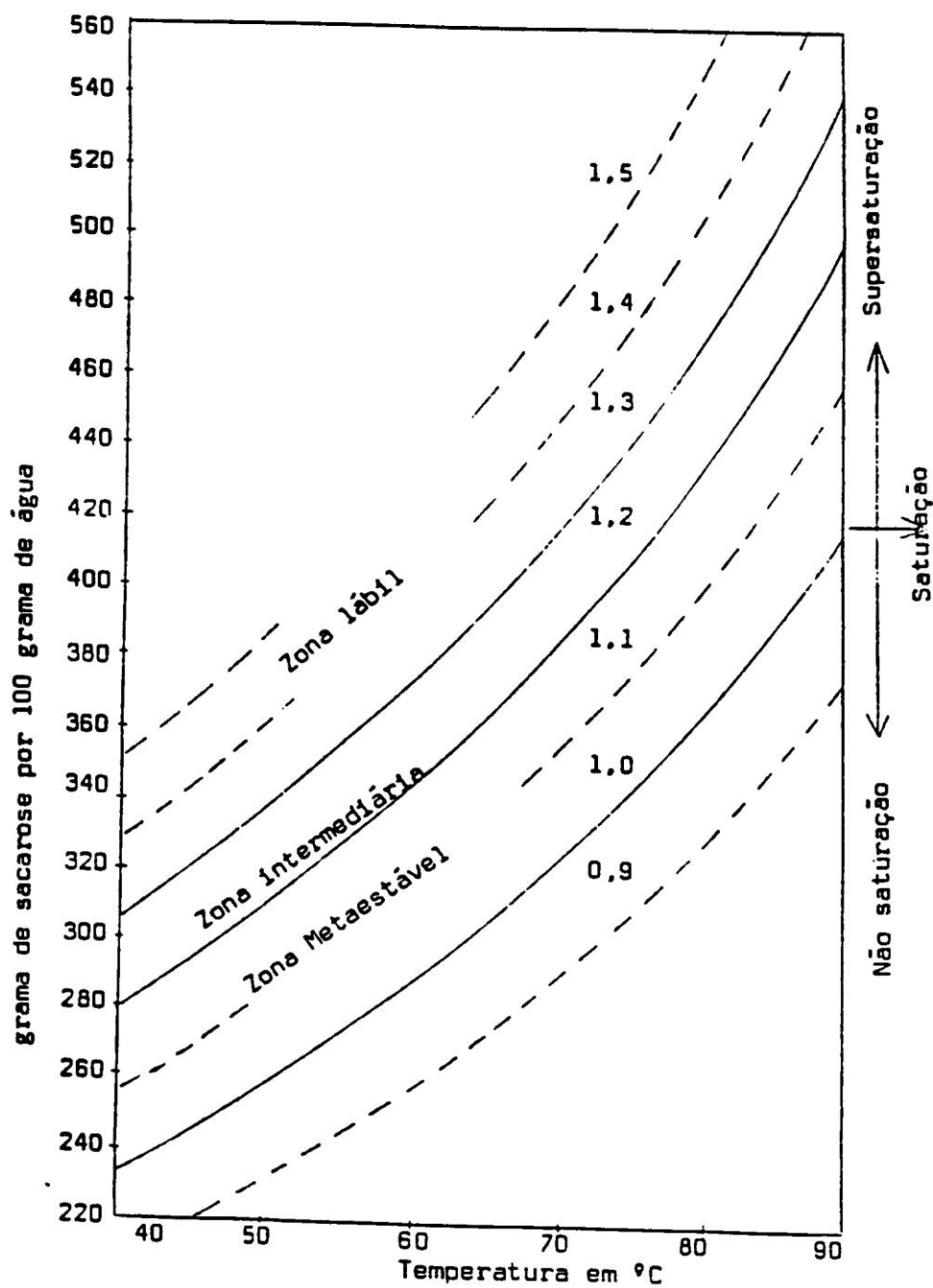


Figura 38. Curvas de saturação e supersaturação de sacarose

#### 8.4. Sistema de cozimento

Na fabricação do açúcar pode se empregar vários esquemas de cozimento, os quais visam em última análise obter um maior ou menor esgotamento do melaço ou mel final, em

função do rendimento industrial desejado. Pela aplicação de um maior número de massas o mel final é bem pobre (figura 39).

Na prática, é possível adotar esquemas de duas massas, de três massas e até de 4 massas. É evidente que, nestes últimos casos, o mel final é bem pobre em sacarose e os cozimentos sendo pobres, ficam mais difíceis de serem manuseados.

Em última análise, nos esquemas de cozimento se procura fazer o reaproveitamento dos méis para novos cozimentos. O mel final é então enviado à destilaria para a produção de álcool. Isto representa uma estratégia adicional na fabricação em casos de usinas com destilaria anexa, que podem obter um maior ou menor esgotamento do mel final em função do mercado de açúcar e de álcool, ou seja, quando o for conveniente a produção de álcool pode-se adotar sistema de uma massa, pois o mel final (mais rico em sacarose) será aproveitado na produção de álcool, como foi observado durante os anos de PROÁLCOOL; caso contrário, quando for interessante uma maior produção de açúcar, podem ser adotados sistemas com maior número de massas, esgotando-se mais o mel e, portanto, obtendo-se mel mais pobre.

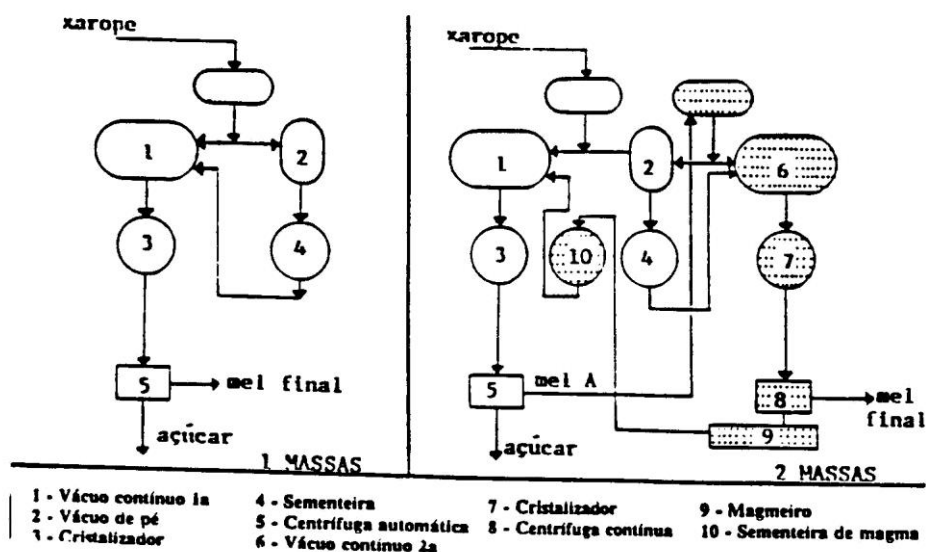


Figura 39. Sistemas de cozimento

## 9. CRISTALIZAÇÃO DE SACAROSE

Após a operação de cozimento chegar ao seu final, a massa cozida é descarregada em equipamentos conhecidos, por cristalizadores.

A massa cozida, descarregada nos cristalizadores, pode ser mantida nesses equipamentos por um período variável de 6 a 72 horas e, em muitos casos, segue-se quase imediatamente para as turbinas, onde se dá a separação dos cristais.

Com o advento da utilização do mel para a fabricação do álcool, o que permite que se trabalhe com menor esgotabilidade, os cristalizadores têm sido utilizados apenas como depósitos para alimentação das centrífugas, situação que pode ser revertida segundo o mercado de açúcar e do álcool.

De qualquer modo, a massa cozida, sendo mantida em movimento nos cristalizadores só traz benefício à usina de açúcar. A massa cozida tem os seus cristais em constante movimento e em contato com a sacarose dissolvida nos méis, continuando-se, assim, o crescimento.

Em resumo, a cristalização dos cristais de sacarose nos cristalizadores tem por objetivo:

- a) aumentar o tamanho dos cristais;
- b) aumentar a esgotabilidade dos méis;
- c) aumentar o rendimento final em termos de quilogramas de açúcar por tonelada de cana moída.

A temperatura da massa cozida à saída dos cozedores varia de 65 a 75° C e nos cristalizadores a massa cozida vai se resfriando, podendo chegar às condições de temperatura ambiente. Entretanto, é necessário que esta massa cozida seja mantida em movimento, pois, caso contrário, ela pode se endurecer e formar um bloco único e de difícil manipulação.

### **9.1. Princípio da operação de cristalização**

A cristalização se processa pela transferência do calor da massa cozida para o ar frio ou para a água que circula nas serpentinas dos cristalizadores.

O resfriamento deve ser cuidadoso e de tal forma que a massa cozida se mantenha na zona metaestável, zona esta em que a sacarose se deposita nos cristais.

### **9.2. Duração da cristalização**

A duração da cristalização, quando tem por objetivo a busca da esgotabilidade dos méis e o máximo de rendimento de fabricação de açúcar obedece aos seguintes dados:

massa cozida	duração em horas
A	6- 12
B	12-24
C	24-72

### 9.3. Tipos de cristalizadores

a) cristalizadores de resfriamento natural ou ar (figura 40).

b) cristalizadores de resfriamento artificial ou a água

- tipo intermitente: Blanchard

- tipo contínuo: Werkspoor

Os mais comuns são os a ar e a água (tipo Blanchard).

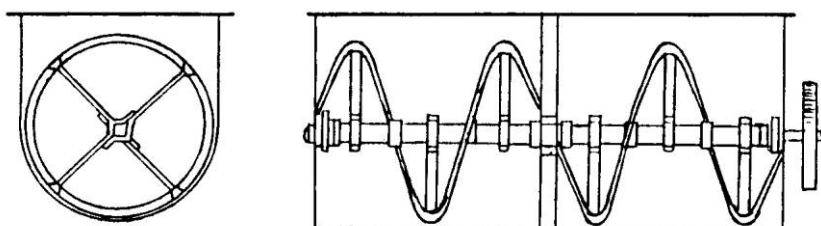


Figura 40. Cristalizador de ar natural

## 10. CENTRIFUGAÇÃO

A separação dos cristais da massa cozida é feita pela ação da força centrífuga em centrífugas de tipos variáveis - fluxo intermitente e fluxo contínuo - em função da natureza da massa cozida.

As centrífugas açucareiras constam essencialmente de cesto perfurado suspenso por um eixo ligado a um motor elétrico, que propicia rotações de 1200-2600 rpm. Nestas centrífugas, a massa cozida é introduzida por gravidade no cesto, sendo que o mel atravessa a tela, enquanto que os cristais são retidos. Durante a operação de centrifugação, em função do tipo de açúcar em processo, os cristais podem ser submetidos a uma lavagem com água e vapor.

O mel proveniente das massas cozidas de maior pureza, retorna ao processo, enquanto que o proveniente da centrifugação da massa cozida de menor pureza, denominada de melaço ou mel final é enviado, normalmente, para a destilaria para a produção de álcool ou comercializado “in natura”. Ilustração do centrifugador na figura 41.

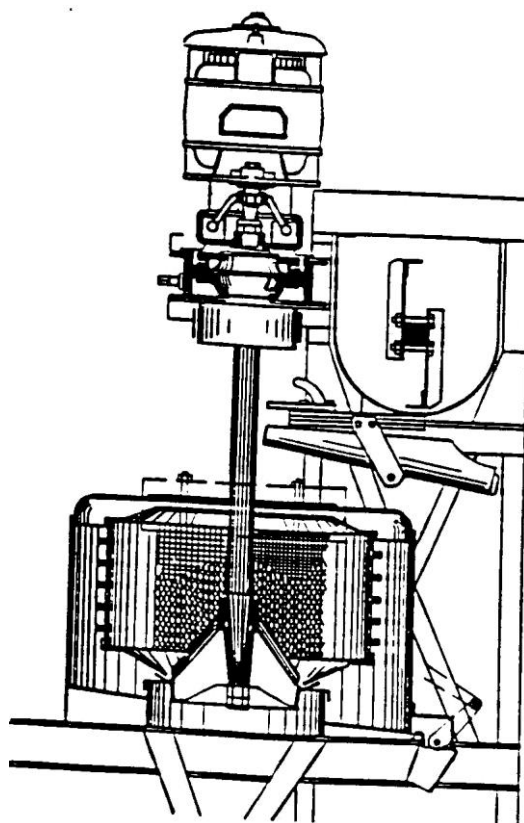


Figura 41. Centrifugador

Nesta operação de centrifugação pode-se lavar o açúcar demerara com água e vapor para a obtenção de açúcar VHP (açúcar de polarização muito alta).

## 11. SECAGEM DO AÇÚCAR

O açúcar que deixa as centrífugas encerra um alto teor de umidade, entre 0,5 a 2,0% , e está a uma temperatura relativamente elevada, entre 56-60° C - deste modo não se apresenta em boas condições para ser ensacado e armazenado. Portanto é necessário que se faça uma prévia secagem e resfriamento.



A secagem do açúcar visa, obviamente, a baixar seu teor de umidade, a tal ponto que não permita o desenvolvimento de microrganismos, os quais causariam deteriorações com perda de sacarose. O resfriamento, por sua vez, evita que ocorra o “empedramento” do açúcar.

O teor de umidade permissível para preservar a qualidade do açúcar, depende de sua polarização. No caso do açúcar branco, deve-se reduzir a umidade dentro de uma faixa de 0,04 a 0,07%.

### 11.1. Secadores de açúcar

Vários são os tipos de secadores utilizados, mas, quanto à sua posição de trabalho, eles podem ser classificados em dois tipos essenciais: o horizontal e o vertical (figura 42).

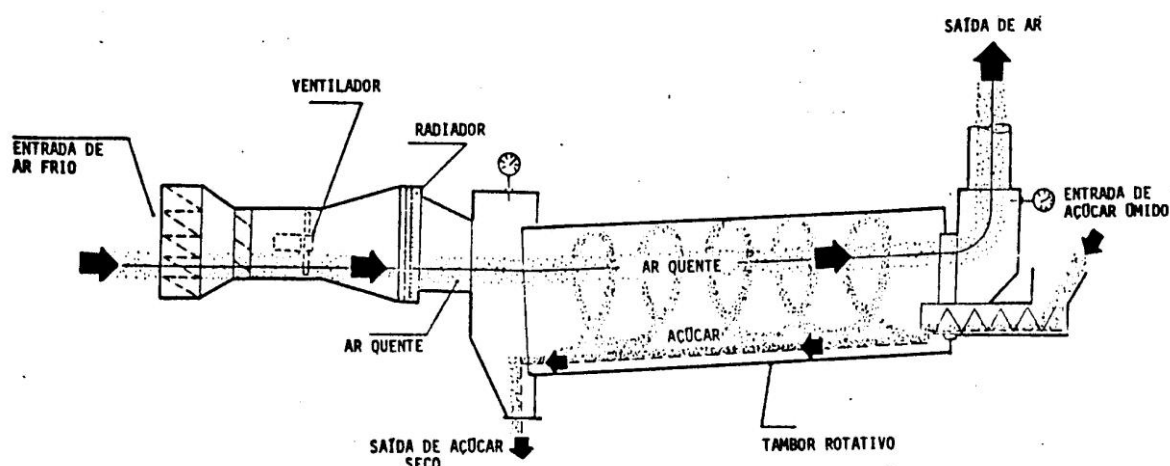


Figura 42.: Secador horizontal em contra-corrente

O ar de secagem deve ser aquecido, pois, a remoção de umidade cresce com o acréscimo de temperatura.

O grau de saturação do ar de entrada também tem importância na eficiência da secagem.

O açúcar entra nos secadores com uma temperatura de 52 – 60 °C e deve deixá-lo com 30 – 35 °C. Para isto o ar utilizado para a secagem tem que ser aquecido, mas não deve estar a uma temperatura superior a 95 – 105 °C, de modo geral está em torno de 70 – 90 °C. Temperaturas acima de 110 °C podem caramelizar o açúcar.

Após a secagem o açúcar deve ser pesado para os controles operacionais necessários.

O açúcar então vai ser armazenado a granel ou acondicionado em sacos (o mais usado é o de juta com capacidade de 50 Kg). Para exportação usa-se muito o “big-bag” com capacidade de 1 tonelada.

## 12. ESTOCAGEM

A melhor condição para estocagem é aquela que não possibilita o crescimento de microrganismos, os quais podem favorecer a decomposição e perda de sacarose. Um grande número de microrganismos pode se desenvolver no açúcar, em condições favoráveis, como: bactérias, fungos e leveduras, principalmente no filme de mel, mas não pode desenvolver-se em elevadas concentrações de sólidos neste filme.

O açúcar a ser armazenado não pode ser seco abaixo da sua umidade de equilíbrio, isto é, com o conteúdo de umidade que está em equilíbrio com o ar que o rodeia. A umidade de equilíbrio varia com a umidade do ar, e, no caso do açúcar demerara, com a natureza e a quantidade de impurezas.

### 12.1. Características de um açúcar para ser armazenado

O açúcar armazenado tem menores possibilidades de se deteriorar se tem as seguintes condições:

- a) ausência relativa de insolúveis no açúcar, isto é, se a massa cozida foi obtida de um caldo bem clarificado;
- b) o cristal consista em um grânulo duro, uniforme, de tamanho médio e livre de conglomerados;
- c) se a relação entre a umidade e a polarização esta dentro dos fatores de segurança;
- d) se o açúcar não foi lavado, isto é, se conserva o filme de mel original;
- e) se foi obtido sob condições sanitárias boas.

Os principais fatores que causam deterioração:

- falta de assepsia no processo
- água de lavagem de açúcar contaminada
- tamanho irregular dos cristais
- retenção excessiva de umidade na película de mel que recobre os cristais
- mistura de açúcares de diferentes polarizações
- presença de microrganismos
- condições anormais de armazenamento.

Dos microrganismos presentes no açúcar, os que aparecem em maior frequência são os fungos e as bactérias termofílicas, e em menor quantidade as leveduras. Deve-se ressaltar, que quanto maior for a umidade do açúcar, melhores serão as condições para o desenvolvimento dos microrganismos.

## **12.2. Empedramento do açúcar**

Esta relacionado ao teor de umidade, temperatura no momento do ensacamento, condições de tempo e armazenamento.

O empedramento do açúcar causará problemas quanto ao armazenamento e ao transporte.

Observou-se que o açúcar bruto ensacado, com teor de umidade acima de 0,8%, apresentava formação de torrões ao armazená-lo. A explicação para esta ocorrência é que o açúcar, ao perder umidade e esfriar, concentra a película de mel que atinge o coeficiente de supersaturação e, nestas condições, a sacarose dissolvida se cristaliza.

Outro fator importante é a temperatura de ensacamento. Se superior a 43° C, aumenta o risco de formação de torrões e endurecimento, pois favorece a evaporação da água, concentrando sacarose no mel, a qual se cristalizara soldando os cristais entre si.

## **12.3. Armazéns de açúcar**

Devem ser considerados distintamente para açúcar a granel e ensacado.

Os armazéns devem ser secos, com especial atenção para o embasamento, piso e cobertura. A cobertura deve ser de um material que tenha bom coeficiente de isolamento térmico ou elevado índice de reflexão dos raios solares, o que dará menor oscilação de temperatura ambiente.

A circulação de ar natural deve ser evitada ao máximo, para que não haja elevação da umidade. Para isso, deve-se manter as portas fechadas e ter o menor número de aberturas possíveis.

As pilhas de sacos deve ser compacta, evitando encostar nas paredes. As pilhas não devem ser colocadas diretamente sobre o piso, e sim sobre um estrado de madeira ou papel betuminoso.

As paredes devem ser impermeabilizadas para evitar infiltração de umidade.

O açúcar armazenado a granel se deteriora mais lentamente, pois, a camada superior, em contato com o ar, absorve água, formando uma crosta que impede a penetração da umidade para o interior da pilha.

Quando a iluminação é artificial deve se tomar cuidado com explosões.



### 13. BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA

- CESAR, M.A.A. ; SILVA, F.C. A cana-de-açúcar como matéria-prima para a indústria sucroalcooleira. Piracicaba : CALQ, 1993. 108p.
- DELGADO, A. ; CESAR, M.A.A. Elementos de Tecnologia e Engenharia do açúcar de cana. Piracicaba : Zanini,1977. 3v.
- HUGOT, E. Manual da Engenharia Açucareira. São Paulo : Mestre Jou, 1969. 2v.
- KAM, A.E.F. Management accounting for the sugar cana industry. Amsterdam : Elsevier, 1988. 275p.
- MARQUES, A.; HORII, J. LCT 458 - Tecnologia Sucroalcooleira Básica. Piracicaba: ESALQ/ Depto. Ciência e Tecnologia Agroindustrial, v.2, 1997. 36p.
- PARANHOS, S.B., coord. Cana-de-açúcar:cultura e utilização. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 2v.
- PAYNE, J.H. Operações unitárias na produção de açúcar de cana. São Paulo: Nobel, 1989. 245p.