



**Universidade do Sagrado Coração – USC**

**Fabiano Silvestrini**

**Busca de excedentes de energia elétrica  
através de melhorias nos acionamentos**

**Bauru**

**2007**

**Universidade do Sagrado Coração – USC**

**Fabiano Silvestrini**

**Busca de excedentes de energia elétrica  
através de melhorias nos acionamentos**

Monografia apresentada ao Centro de Ciências Exatas e Sociais Aplicadas da Universidade do Sagrado Coração como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Química, sob a orientação da Profa. Dra. Sirlei Roca.

**Bauru**  
2007

## **Dedicatória**

A meus pais Libio Silvestrini e Maria do Carmo Moraes Silvestrini que me mostraram o caminho e me deram a humildade que me permitiu chegar até aqui.

À minha querida esposa Vanieli Oliveira do Nascimento Silvestrini e ao meu filho João Pedro Silvestrini

Dedico este trabalho.

## **Agradecimentos**

Agradeço em primeiro lugar a Deus por ter me dada saúde e força para superar as dificuldades enfrentadas.

A Professora Dra Sirlei Roca, pela orientação e apoio na superação das dificuldades surgidas.

Aos amigos

Danilo Piccolo, Marco Lera, Antonio Carlos Viesser, Geraldo José Borin, Jose Eduardo Beber pela contribuição, compreensão e o apoio na realização deste trabalho.

## **Resumo**

As usinas de açúcar e álcool do Brasil apresentam um grande potencial para geração de energia elétrica excedente através da cogeração. Para que esse potencial seja explorado em sua plenitude é necessário que ocorra nas usinas uma implementação de tecnologias mais eficientes energeticamente. Tais implementações compreendem entre outras, substituição de caldeira que operam em baixas pressões e temperaturas por caldeiras que operam a pressões e temperaturas mais elevadas e a substituição de turbinas a vapor de simples estagio por turbinas a vapor de múltiplo estagio, ou melhor, ainda por motores elétrico.

O objetivo deste trabalho é mostrar que a unidade açucareira tem potencial interno para melhorias que permitam obter excedentes de energia elétrica, via transformação ou até mesmo substituição de turbinas ineficientes por motores elétricos de alto rendimento. Com isso aumentar a comercialização desta energia elétrica excedente.

## **Abstract**

The plants of acucar and alcool of Brazil present a great potential for geracao of exceeding eletrica energy atraves of cogeraçao. So that this potential is explored in its fullness and necessario that implementaçao of more efficient technologies energeticamente occurs in plants one. Such implementaçoes understand among others, substituicao of boiler that operate in low pressures temperatures for boilers that operate pressoes higher temperatures and substituicao of turbines the vapor of simple I serve as apprentice for turbines the vapor of multiplo I serve as apprentice, or better, still for eletricos engines.

The objective of this work and to show that the acucareira unit has internal potential for improvements that allow to get excesses of eletrica energy, saw transformaçao or exactly ties substituicao of inefficient turbines for eletricos engines of high income. With this to increase commercializes it? of this exceeding eletrica energy.

## Sumário

1 - Introdução.....	01
2 - Breve histórico.....	02
3 - A cana-de-açúcar.....	05
4 - Processamento da cana-de-açúcar.....	07
4.1 – Colheita.....	07
4.2 – Transporte.....	08
4.3 - Pesagem e amostragem de cana.....	08
4.4 – Armazenamento.....	09
4.5 - Descarga e Limpeza da cana.....	10
4.6 - Preparo da cana.....	11
5 - Processo de fabricação de açúcar e álcool.....	14
5.1 - Fluxograma de processo.....	14
5.2 - Extração do caldo.....	15
5.3 - Tratamento do caldo da cana.....	15
5.4 - Processo de fabricação de açúcar.....	16
5.4.1 – Evaporação.....	16
5.4.2 – Cozimento.....	17
5.4.3 – Centrifugação.....	18
5.5 - Processo de fabricação do álcool.....	19
5.5.1 - Fermentação alcoólica.....	19
5.5.2 – Centrifugação.....	20

5.5.3 - Destilação alcoólica.....	21
6 - Geração de vapor e energia elétrica (Cogeração).....	24
6.1 - Tipos de Ciclos de Cogeração.....	24
6.1.1 - Cogeração Tipo Topping.....	25
6.1.2 - Cogeração Tipo Bottoming.....	25
6.2 - Balanço de Massas.....	27
6.3 - Referencias Mundiais.....	28
6.4 – Produção de Energia Elétrica Através da Cogeração na Industria da Cana-de-açúcar e o Meio Ambiente.....	34
6.5 – Equipamentos utilizados no processo de cogeração de uma usina de açúcar e álcool.....	35
6.5.1 – Caldeiras.....	35
6.5.1.1 – Histórico.....	35
6.5.1.2 - Classificação das Caldeiras.....	38
6.5.1.3 - Superaquecedores Economizadores e Pré Aquecedores de Ar.....	42
6.5.2 - Turbinas a Vapor.....	45
6.5.2.1 – Histórico.....	45
6.5.2.2 - Classificação Segundo o modo de ação do vapor sobre as paletas.....	46
6.5.3 - Geradores e Motores.....	55
7 - Conclusões.....	58
8.- Referencias e Bibliografia consultada.....	59



## **Introdução**

A primeira etapa do processo produtivo das usinas de açúcar e álcool é a extração do caldo de cana do bagaço, o qual é destinado a processos de tratamento e concentração de sólidos, até se chegar nos produtos açúcar e álcool. O bagaço por sua vez é queimado em caldeiras onde a energia calorífica liberada faz com que a água, no interior dos tubos da caldeira, se transforme do estado líquido para o gasoso, produzindo assim o vapor.

Em meados de 2000 e 2001, quando a falta de energia elétrica mostrou a necessidade de constantes melhorias em todos os processos para evitar desperdício de energia e hoje, mais do que nunca, o uso racional e a economia de energia nos processos industriais são as palavras de ordem da indústria brasileira.

A análise da situação atual, a unidade açucareira, localizada em Bocaina, pode definir as melhorias do seu setor energético em função dos seus objetivos de curto e de médio prazo, lembrando que novas variáveis de mercado se tornam cada vez mais significativas, como a comercialização de energia elétrica excedente.

O trabalho visa mostrar que a unidade açucareira tem potencial interno para melhorias que permitam obter excedentes de energia elétrica, via transformação ou até mesmo substituição de turbinas ineficientes por motores elétricos de alto rendimento.

## 2. Breve histórico

A cana de açúcar é uma planta da família das gramíneas caracterizada pela alta eficiência fotossintética, que proporciona o armazenamento de energia na forma de sacarose internamente ao tecido parenquimatoso dos colmos da planta.

Não se pode definir com exatidão a época do surgimento da cana de açúcar no mundo, nem tampouco dizer, com precisão, seu berço geográfico, principalmente devido à falta de documentação a respeito. A hipótese mais aceita pelos historiadores atualmente é a de que a cana tenha surgido há cerca de 12 mil anos, no continente asiático.

A cana foi introduzida na China por volta de 800 a.C. e existem registros de produção de açúcar cru na região a partir de 400 a.C.

O primeiro processo de produção de açúcar de que se tem notícia data de 300 d.C. e foi encontrado em um documento religioso hindu. O processo consistia em esmagar e ferver a cana, dando origem ao melaço.

O Ocidente só conheceu a cana de açúcar a partir do século XI, quando os cruzados retornaram dos países árabes com o chamado “mel pagão”. Os primeiros registros do açúcar na Inglaterra datam de 1099 e, em 1150, a Espanha já investia em sua indústria canavieira. Em 1319, um quilo de açúcar valia, aproximadamente, US\$ 100, o que tornou o mercado de produção e comercialização do produto cada vez mais atrativo. Como a demanda pelo produto não parava de crescer, os portugueses levaram a cana de açúcar até a recém-descoberta Ilha da Madeira, em 1419.

Segundo portal ÚNICA 2003 falando sobre o novo mundo:

*A primeira inserção da cana no Novo Mundo deveu-se a Cristóvão Colombo, levada em sua segunda viagem marítima, em 1493, e plantada na República Dominicana, na ilha de La Española, nas proximidades do povoado de La Isabela, ao norte, e no Haiti. Daí, a gramínea expandiu-se para Cuba (1516) e México (1520). O primeiro engenho do continente foi instalado em La Española, em 1516.*

Os portugueses, a partir de 1530, multiplicaram as plantações de cana no Brasil, destinando quase que a totalidade da produção para a Europa. O crescimento da economia açucareira no Brasil mostrou-se acelerado, uma vez que a produção passou de 2.470 toneladas em 1560 para 16.300 toneladas em 1600 e 20.400 toneladas em 1630. O açúcar era enviado para Lisboa, e, principalmente para Antuérpia, que se tornou o grande centro de refino e distribuição de açúcar (FLANDRIN, 1996).

Com a entrada dos Ingleses no mercado, investindo em moinhos na Jamaica e na Ilha de São Domingos, a concorrência pelo mercado tornou-se mais acirrada. A partir do século XVIII, o aumento do número de colônias produtoras fez com que o preço do açúcar caísse.

As revoltas que levaram à independência de diversas dessas colônias e o declínio da economia açucareira no Brasil após a ascensão holandesa no mercado através das plantações instaladas nas Antilhas Holandesas, Cuba tornou-se o maior centro produtor açucareiro do mundo.

No Brasil, a substituição da mão-de-obra escrava pela tecnologia trouxe grandes ganhos de produtividade, transformando os engenhos em usinas.

No século XX, a concorrência acirrada no mercado de açúcar e a insegurança mundial em relação ao abastecimento de petróleo, que teve duas graves crises nos anos 70, levaram o Brasil a investir na produção do álcool combustível, tanto como aditivo para gasolina quanto para o uso nos recém-criados motores a álcool. O projeto Proálcool, criado em 1975, teve papel decisivo para a posição de maior produtor de açúcar e álcool, ocupada pelo Brasil atualmente. O projeto consistia no fomento de novos investimentos em destilarias que pudessem produzir álcool etílico hidratado carburante (AEHC), sendo grande parte das usinas brasileiras desta época.

Em meados dos anos 90, o setor experimentou nova crise, com a queda dos preços do petróleo no mercado mundial. Os veículos a álcool tiveram sua produção drasticamente reduzida e diversas destilarias foram fechadas. Os maus resultados econômicos apresentados pelas destilarias levaram muitos usineiros a mudar o foco de produção para o açúcar, produto que não apresentava grandes margens de lucro na época, mas que, ao contrário do álcool, mantinha uma demanda relativamente constante.

Atualmente, o setor vem novamente dando sinais de crescimento, motivado principalmente por alguns fatores: no caso do álcool, a alta dos preços do petróleo, causada principalmente pelas recentes instabilidades políticas no Oriente Médio e a entrada em vigor, a partir de 2005, do protocolo de Kyoto, que limita a quantidade de poluentes emitidos pelos países, levando nações desenvolvidas como, por exemplo, o Japão, o Canadá e a Suécia a promulgarem leis que obriguem a adição de álcool à gasolina. No Brasil os carros bi-combustível vêm impulsionando as vendas de álcool carburante para o mercado interno, respondendo por cerca de 35% do total de carros vendidos no país, União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA). Para o caso do açúcar, as exportações mostram-se um futuro muito promissor, devido à queda de barreiras alfandegárias para o açúcar brasileiro que entra na comunidade européia e a perspectiva, por determinação da Organização Mundial de

Comércio (OMC), da proibição do subsídio e do protecionismo que os países europeus oferecem aos produtores locais. Hoje em dia, a Rússia é o maior importador de açúcar brasileiro com 3,84 milhões de toneladas em 2003, seguida pelos Emirados Árabes Unidos com 0,98 milhões e Nigéria, com 0,82 milhões, União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA).

Na safra 2003-2004, foram moídas 357,5 milhões de toneladas de cana-de-açúcar (UNICA), representando um crescimento de 11,5% em relação à quantidade moída na safra anterior e 48,5% em relação à safra 1994-1995. A produção de açúcar na safra 2003-2004 foi de 24,82 milhões de toneladas, com crescimento de 9,95% em relação à safra do ano anterior e 112% em relação à safra 1994-1995. No caso do álcool, a safra 2003-2004 apresentou produção de 14,72 bilhões de litros, que foi 16,65% maior que no ano anterior e 15,9% superior a 1994-1995 (UNICA).

O faturamento das usinas brasileiras somou, na safra 2003-2004, cerca de 17,9 bilhões de reais.

### 3. A cana de açúcar

De acordo com Marques (2001, p. 42), a cana-de-açúcar é uma gramínea formada por colmos interligados por nós. O colmo é constituído por duas fases, uma sólida e outra líquida. A parte sólida é composta por celulose, ligninas e outros açúcares de alto peso molecular e é chamada genericamente de fibra. A parte líquida é uma solução aquosa que contém uma grande variedade de componentes, como pode ser observado na Figura 01.

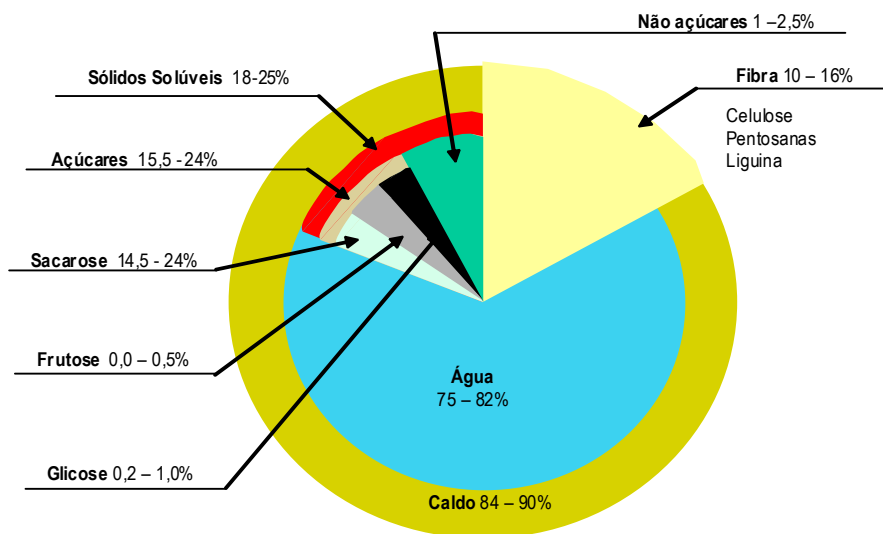


Figura 01: Composição Básica da cana-de-açúcar.

A casca da planta envolve uma matriz de células parenquimatosas de paredes muito finas, nas quais estão encaixados os feixes vasculares, constituindo a parte que é comumente chamada de “fibra” da porção fibrosa, enquanto que o tecido parenquimatoso é chamado de “medula”. Tanto a fibra quanto a medula são definidas como fibra nas análises normalmente realizadas.

O tecido parenquimatoso forma a parede das células que armazenam o caldo.

Dentro dos feixes vasculares, encontram-se dutos que vão desde a raiz até as folhas. Este sistema de dutos transporta tanto a água quanto os nutrientes de que a planta necessita para a fotossíntese (sentido ascendente), quanto os produtos da fotossíntese. Deste modo, também existe caldo nos feixes vasculares, porém este é mais diluído, e, pelo fato de a parede dos vasos ser mais espessa. Este caldo é conhecido como caldo em trânsito.

Próximo aos nós e à casca, os feixes vasculares ficam mais próximos uns dos outros, originando um caldo com menor teor de sacarose em relação ao que seria originado com a moagem dos colmos.

## 4. Processamento da cana-de-açúcar.

### 4.1 Colheita

Até os dias de hoje, mais de 80%, União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA) da cana colhida é cortada à mão (Figura 02). O trabalho de corte manual é precedido pela queima da palha da cana para aumentar a produtividade e proporcionar maior segurança ao trabalhador. A colheita mecanizada (Figura 03) vem ganhando espaço nos últimos anos, mas seu avanço ainda é lento e passa por algumas dificuldades, como por exemplo, a necessidade de reaproveitamento da mão de obra utilizada no corte da cana, o aumento da incidência de pragas e a erosão.



Figura 02 : Corte manual de cana-de-açúcar.



Figura 03 : Colheita mecanizada de cana-de-açúcar.

#### 4.2 Transporte

De acordo com Marques (2001, p.53), no estado de São Paulo, o transporte da cana-de-açúcar da lavoura até a usina é realizado, principalmente, por caminhões, o que requer uma malha viária adequada para a circulação de grande número de veículos de carga pesados.

Os caminhões normalmente utilizados neste tipo de transporte são os do tipo “truck”, que podem tracionar mais uma ou duas carretas.

#### 4.3. Pesagem e amostragem da cana

Ao entrarem na usina, os caminhões são pesados em balanças rodoviárias, com o objetivo de quantificar a matéria-prima que entra no processo, para possibilitar, dentre outras informações, a obtenção do rendimento do processo de fabricação.

A amostragem é outra fase importante do ponto de vista de controle de qualidade de matéria prima e que ocorre quando da entrada do caminhão na usina, antes que o caminhão seja descarregado, a cana é analisada através de um tomador de amostras de cana-de-açúcar fornece os dados de qualidade da cana de açúcar conforme mostra na Figura 04.

#### Tomador de Amostras

Retira amostras de cana para serem analisadas no laboratório, onde obtemos resultados para qualificar a matéria-prima.



Figura 04 : Tomador de Amostras de cana-de-açúcar.

As análises realizadas na cana-de-açúcar que serão posteriormente utilizados para calcular os rendimentos e outros parâmetros do processamento, são de acordo com a Figura 06.



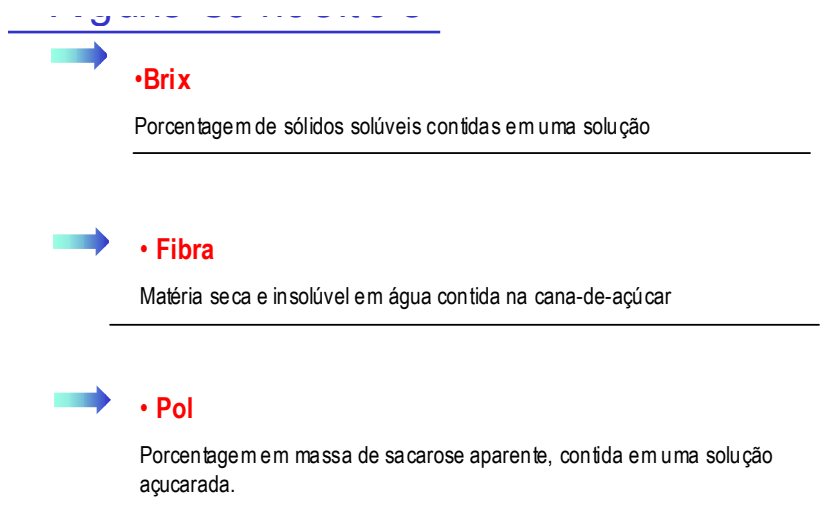


Figura 05: Alguns conceitos usados nas Usinas de açúcar e álcool.

Quando a cana é proveniente de terceiros, a amostragem possibilita a obtenção da base de cálculo para o preço que será pago pela usina ao fornecedor, uma vez que este é diretamente proporcional à pol da cana. Este método de avaliação da matéria-prima é conhecido como PCTS (pagamento da cana pelo teor de sacarose).

#### 4.4. Armazenamento

Algumas usinas ainda usam o processo de armazenamento da cana-de-açúcar, este processo deve ser evitado pelo fato da cana-de-açúcar deteriorar-se com facilidade. Durante o período de armazenamento, a cana passa por processos como a inversão da sacarose, causada pelas próprias enzimas da planta e por microorganismos, que acarreta queda de rendimento dos processos. Além disso, a contaminação da cana pela proliferação de microorganismos pode provocar o desenvolvimento de gomas, que são prejudiciais para os processos de fabricação do açúcar e do álcool, (ver a Figura 06).

## DETERIORAÇÃO

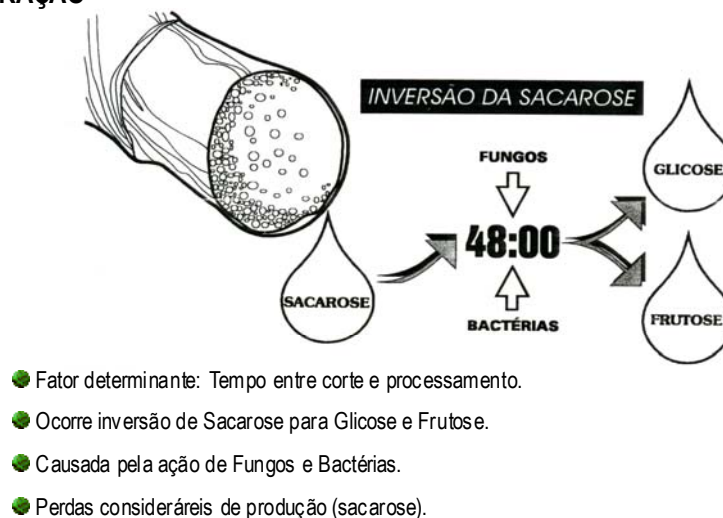


Figura 06 : Processo de Deterioração da cana-de-açúcar.

### 4.5. Descarga e limpeza da cana

De acordo com Marques (2001, p. 57), no Brasil, a descarga da cana dos caminhões é feita, principalmente por sistemas de guindastes laterais móveis (guindaste tipo hilo).

A alimentação de cana para as moendas é feita através de equipamentos denominados Mesas Alimentadoras, que tem como funções básicas lavar e conduzir a cana até a esteira principal do sistema de extração de caldo.

No momento da carga do caminhão na lavoura é grande a quantidade de terra arrastada com a cana a ser retirada continuamente pelo sistema de limpeza.

Grande parte da terra é removida nas mesas alimentadoras, que são equipamentos fixos, inclinados a um ângulo de 45 graus, para aumentar eficiência de lavagem, construídos por vigas e chapas metálicas, tendo aproximadamente 10 metros de largura, 6 de altura por 6 de comprimento e que utilizam enormes volumes de água para esta função.

A cana é conduzida nessas mesas por arrastadores presos a diversas correntes metálicas especiais, movidas através de engrenagens fixas a um eixo principal, acionado por conjunto moto redutor elétrico, como visto na Figura 07.

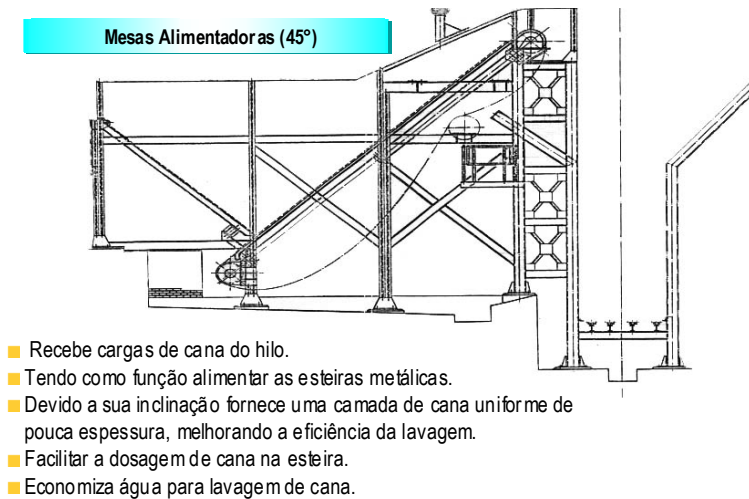


Figura 07: Mesa alimentadora.

A água utilizada pertence a um circuito fechado de reutilização denominado Decantador de água de lavagem de cana, que utiliza o processo da decantação para separar a terra da água, e então reutilizá-la.

Devido a grande quantidade de matéria orgânica, esta água é tratada com leite de cal  $[Ca(OH)_2]$ , até um pH básico de 11. Do decantador, a água é enviada, através de moto bombas, até as mesas onde é novamente distribuída sobre a cana. Com a lavagem de cana é possível retirar grande quantidade de impureza mineral, a desvantagem de lavar cana é a perda de sacarose que ocorre neste processo.

#### 4.6. Preparo da Cana

O preparo da cana é a operação realizada antes da extração. Tem por objetivo, quebrar e abrir a estrutura do maior número possível de células da cana, onde se localizado o açúcar, facilitando sua retirada por esmagamento (Moendas). A sua eficiência, ou seja, a quantidade de caldo extraído, depende diretamente da qualidade da mesma.

O processo inicia-se com a cana lavada sendo lançado numa esteira metálica denominada esteirão de cana, que pertencente ao sistema de extração, cuja finalidade é conduzi-la até ao preparo. Ela é uma esteira horizontal de pequena inclinação e de grande

comprimento, variando de 40 a 70 metros, formada por taliscas presas a correntes metálicas de arraste, movidas através de engrenagens fixas a um eixo, acionado por conjunto moto redutor elétrico.

Dispostos transversalmente sobre o esteirão de cana estão os picadores, equipamentos rotativos de grande potência (1000 HP), acionados por turbinas a vapor, girando a 630 rpm no mesmo sentido do fluxo da cana. São constituídos por facas metálicas rigidamente fixadas a suportes distribuídos ao redor de um eixo metálico, maciço, acoplado ao sistema de acionamento (redutores e turbina a vapor) do conjunto. A cana é obrigada a passar por entre as facas girantes que a reduzem a pequenos pedaços, para o posterior desfibramento.

Os desfibradores são equipamentos rotativos de grande potência (1500 HP), acionados por turbinas a vapor, dispostos transversalmente sobre o esteirão de cana, logo após os picadores, girando a 720 rpm no sentido contrário ao fluxo da cana. São constituídos por martelos metálicos (37 kg cada), fixados não rigidamente a suportes distribuídos ao redor de um eixo metálico, maciço, acoplado ao sistema de acionamento (redutores e turbina a vapor) do conjunto. A cana picada é obrigada a passar por entre os martelos girantes, que através do choque, rompem a estrutura das células liberando o caldo que contém o açúcar.

Essa parte da exige grande potência dos equipamentos envolvidos (picadores e desfibradores), devido a quantidade de cana e ao sistema utilizado (atrito e choque mecânico), para picar e desfibrar. Nas Figuras, 08, 09 e 10, abaixo é possível ver estes sistemas:

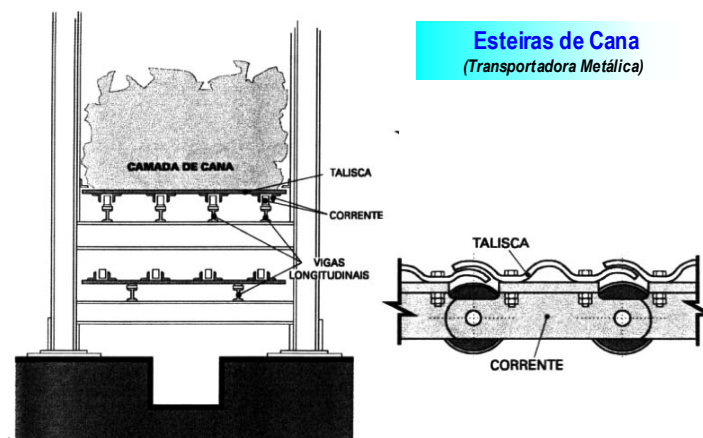


Figura 08: Esteirão Metálico.

## Preparo de Cana

Transforma a cana em um material homogêneo, composto por longas fibras, o que facilita a alimentação no primeiro terno e melhora a extração.

### Objetivos

- Ø Promover o rompimento da estrutura da cana;
- Ø Romper as células da cana para facilitar a extração do caldo;
- Ø Aumentar a densidade da cana;
- Ø Melhorar a eficiência da embebição.



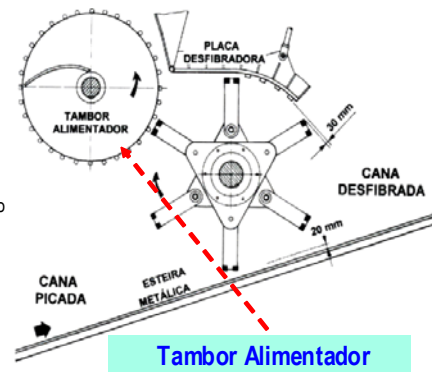
Figura 09: função do preparo de cana.

### Desfibrador

v Completa o preparo de Cana rompendo a maior quantidade possível de células – desfibrando a cana.

v Realiza o desfibramento da cana picada ao esfregá-la contra uma placa desfibradora.

v A placa desfibradora é fixada logo acima do rotor, tem formato curvo e acompanha o diâmetro do giro dos martelos.



◆ Força a passagem de cana entre os martelos e a placa desfibradora.

◆ Posiciona-se antes do rotor em nível pouco acima.

Figura 10: Desfibrador de cana.

## 5. Processo de fabricação de açúcar e álcool

### 5.1. Fluxograma de processo

O fluxograma de processo básico de uma usina de açúcar e álcool pode ser verificado na figura abaixo (Figura 11).

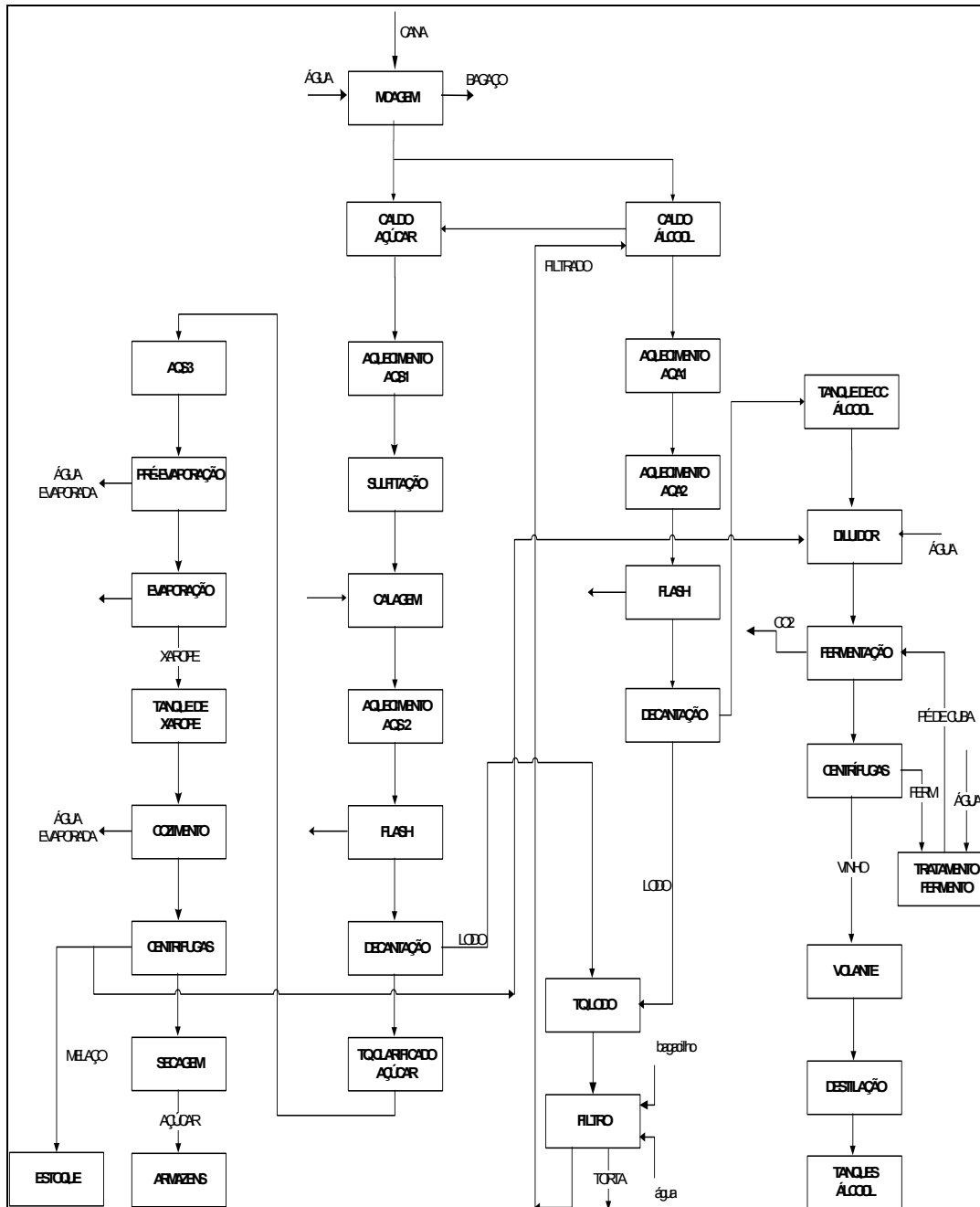


Figura 11: Fluxograma de processo da obtenção do açúcar e do álcool

### 5.2. Extração do Caldo (Moenda)

Os Conjuntos de extração de caldo do tipo Moenda de cana caracterizam-se pela extração do caldo por esmagamento ou prensagem, isto é, submetem a cana desfibrada a uma pressão mecânica muito grande, que aumenta à medida que o mesmo é extraído nos vários estágios desta operação.

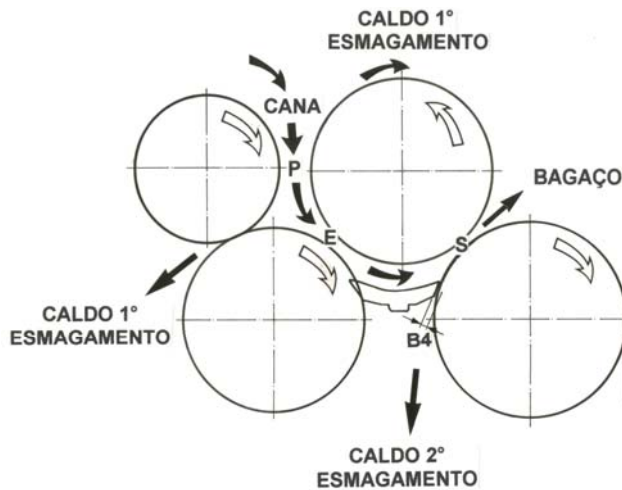


Figura 12: Circuito da cana-de-açúcar entre os rolos de moenda.

É um sistema repetitivo de 6 estágios de prensagem denominado historicamente de moagem, que alia a pressão mecânica e a embebição composta para atingir índices de extração da ordem de 96 %.

### 5.3. Tratamento do caldo da cana

Apesar da lavagem da cana, durante o processo de alimentação, o caldo extraído nas moendas, ainda contém grande quantidade de impurezas orgânicas e minerais tais como, terra, cera vegetal, colóides e microorganismos, que precisam ser eliminados para se ter uma boa qualidade de açúcar e eficiência na produção de álcool.

O processo de tratamento do caldo mais utilizado no Brasil é a sulfodefecação a quente com a adição de leite de cal  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ , seguida de clarificação por decantação a quente.

Para acelerar a operação da decantação contínua (clarificação), e destruir microorganismos nocivos à produção, eleva-se à temperatura do caldo caleado sob pressão, até 105 °C em aquecedores indiretos a vapor, para em seguida e rapidamente, despressurizá-lo reduzindo por flasheamento sua temperatura para 98°C, num processo de semipasteurização, que elimina grande quantidade de bactérias, bacilos e esporos.

O sistema de clarificação por decantação baseia-se no fato que a grande maioria das impurezas presentes neste ponto do processo, são mais pesadas que o caldo, e por conseqüência se precipitam para o fundo do meio em que se encontram, ou seja, decantam quando a velocidade de movimentação do mesmo é baixa.

Isso se consegue colocando o caldo aquecido em tanques cilíndricos estáticos de grande volume feitos em chapa grossa de aço carbono, denominados de decantadores de caldo (figura 13). São dotados de raspador giratório de fundo, com a finalidade de conduzir as impurezas para o ponto de descarga.

O caldo sobe lentamente pelo equipamento em direção à saída, enquanto a sujeira mais pesada desce em direção ao raspador. A decantação é ainda acelerada pela adição química de polímeros floculantes, que aglutina e aumenta o peso das impurezas suspensas, precipitando-as mais rapidamente.

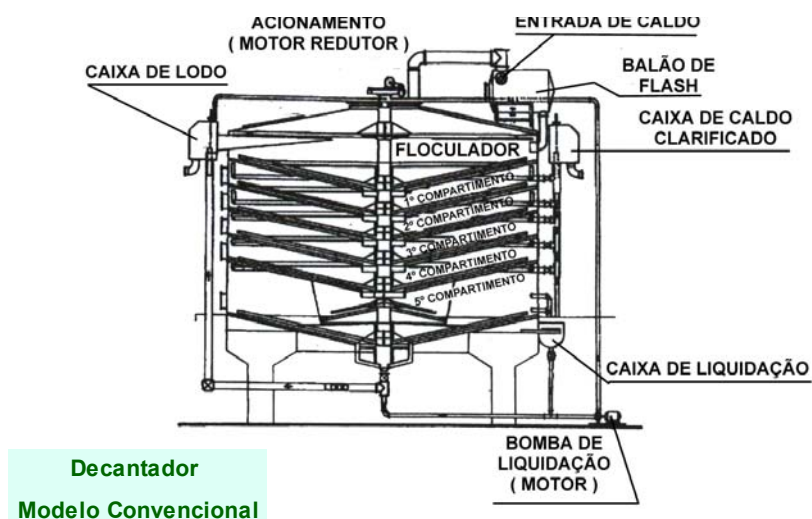


Figura 13: Decantador de caldo.

#### 5.4. Processo de fabricação de açúcar

O caldo agora clarificado, formado basicamente por água e açúcar dissolvido, entra numa fase de concentração.

##### 5.4.1 Evaporação

A primeira fase desta concentração é denominada de evaporação. É realizado em equipamentos contínuos denominados evaporador (figura 14), que são responsáveis pela eliminação de aproximadamente 90% da água contida no caldo.



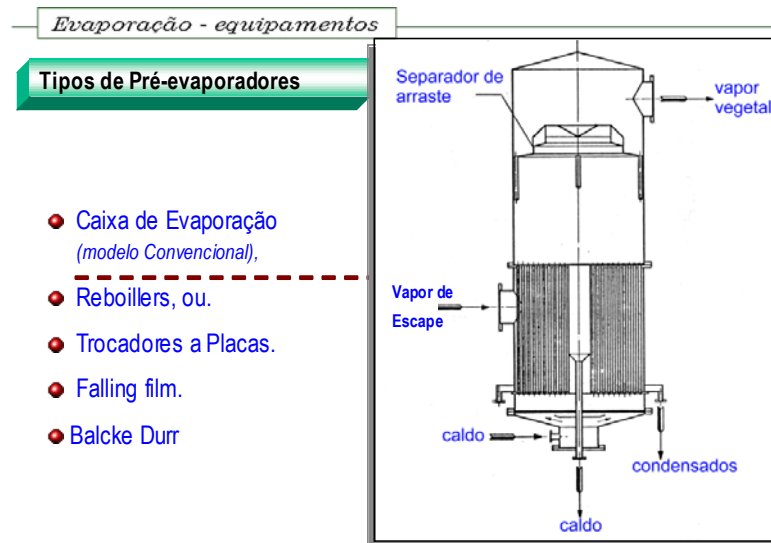


Figura 14: Evaporador de Caldo.

Apesar da grande quantidade de água eliminada, o resultado da evaporação, o xarope, denominação do caldo concentrado a 60% (sessenta por cento da mistura é açúcar) ainda continua na fase líquida, sem atingir o ponto de saturação.

#### 5.4.2 Cozimento

A segunda fase da concentração, denominada de cozimento, é considerada a operação mais difícil e importante da produção de açúcar, por ser nela que se define o tipo, o formato e o tamanho dos cristais de açúcar.

A operação de cozimento é um processo descontínuo denominado de batelada, que se baseia na retirada da água restante no xarope até o ponto da super saturação, quando mais de 90% da mistura é açúcar. O equipamento utilizado é denominado de *vacuum pan* ou simplesmente cozedor a vácuo.

Assemelha-se construtivamente a um evaporador, diferenciando apenas na quantidade, na altura e no diâmetro dos tubos da calandra (trocador de calor).

O corpo, que é um pouco mais baixo que o do evaporador, devido à alta densidade média da massa cozida, é ligado a um condensador barométrico por multijato de alta capacidade que condensa a água evaporada e gera a depressão necessária para a perfeita operação.

O resultado desta operação é uma massa açucarada denominada de massa cozida, formada por cristais de açúcar (cristais de sacarose), mel de açúcar (glicose, frutose) e uma pequena parcela de água.

#### 5.4.3 Centrifugação

O açúcar agora, em estado sólido na forma de cristais e presente na massa cozida, precisa ser separado do mel, que se encontra em estado líquido. A centrifugação é um processo de separação sólido/líquido que utiliza a força centrífuga como agente separador.

As centrifugas de açúcar (figura 15), responsáveis por esta separação, são equipamentos formados por um cesto cilíndrico construído em chapa perfurada, montado com um eixo central em posição vertical e acionado diretamente por um motor elétrico, também em posição vertical, de grande potência (200 HP) e rotação elevada (1200 rpm) controlada eletronicamente.

Internamente, o cesto é revestido por tela de aço inox com orifícios de pequeno diâmetro (inferiores ao tamanho médio dos cristais de açúcar), possuindo ainda sistema raspador de tela e fundo removível.

Com a centrífuga girando em baixa rotação (60 rpm), o cesto é carregado de massa cozida com cargas que variam de 800 kg a 1000 kg dependendo do tipo e da qualidade do açúcar a ser feito, e então a rotação é elevada rapidamente para 1200 rpm, permanecendo nesta velocidade por aproximadamente 3 minutos.

Durante este período a força centrífuga comprime a massa cozida contra a tela de inox, que só permite a passagem da parte líquida, o mel, e retém os cristais de açúcar que são maiores que os orifícios da mesma.

#### CENTRÍFUGA

##### Centrífuga Descontínuas

Este tipo de centrífuga é normalmente utilizada para centrifugação de massa A para produção de açúcar cristal, demerara e VHP.

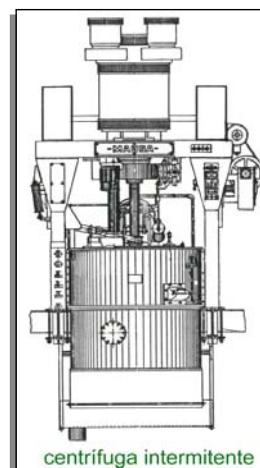


Figura 15: Centrífuga de Açúcar.

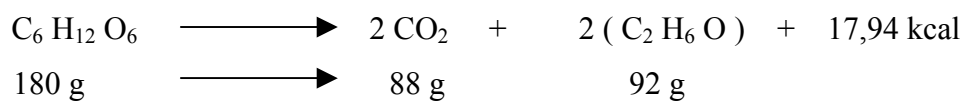
Novamente com a máquina em baixa rotação (60 rpm), o fundo do cesto é então aberto e o raspador de tela acionado coletando todo o açúcar retido. O mel é enviado para a destilaria para a produção de álcool e o açúcar para os Secadores de açúcar onde é secado, embalado e conduzido através de esteiras transportadoras de borracha para os armazéns de açúcar para estocagem e ou expedição.

### 5.5. Processo de fabricação do álcool

#### 5.5.1 Fermentação alcoólica

A fermentação alcoólica é a operação mais complexa e importante da fabricação do álcool, por tratar com organismos vivos e concentrar mais de 95% da eficiência da produção. É uma reação química exotérmica que transforma as moléculas de açúcar, em moléculas de álcool e gás carbono liberando energia térmica.

Reação e estequiometria geral da fermentação alcoólica



O agente da fermentação é um microorganismo vivo conhecido popularmente como fermento e tecnicamente como *Saccharomices cerevisiae*, (figura 16), que foi biologicamente desenvolvido e adaptado para a indústria alcooleira a partir de fermentos conhecidos usado por indústrias alimentícias na produção de pães, bolos e outros.

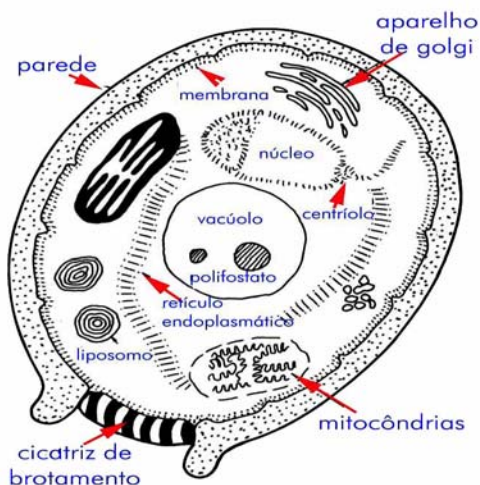


Figura 16: Levedura *Saccharomices cerevisiae*.

O caldo clarificado vindo da decantação, o mel, vindo da produção de açúcar, e água tratada são misturados continuamente em proporções tais que a mistura agora denominada mosto, tenha uma concentração final de sólidos dissolvidos da ordem de 20%.

O mosto, e uma quantidade calculada de fermento são colocados em tanques metálicos, cilíndricos, verticais, de grande volume, denominados dornas de fermentação.

O processo pode ser por batelada ou contínuo, ou seja, alimenta-se uma dorna durante aproximadamente cinco horas, e então se espera o fermento transformar todos os açúcares fermentescíveis contidos no mosto em álcool. O ciclo completo de fermentação dura aproximadamente 12 horas.

Neste período o fermento metaboliza todo o açúcar contido no mosto liberando calor e gás carbônico. O gás carbônico produzido durante a fermentação pode ser liberado para a atmosfera ou passar por um sistema de lavagem de gases, com o objetivo de se recuperar o etanol na fase vapor que é carregado com o CO<sub>2</sub> durante a fermentação.

A mistura ao final do processo passa ser chamada de vinho e é formada por água, etanol, fermento e uma pequena quantidade de outros elementos.

A energia térmica liberada na reação é prejudicial, pois aquece a mistura acelerando a proliferação de bactérias termofílicas e destruindo o fermento.

Assim a temperatura da dorna é controlada e mantida próxima de 32 °C, por um sistema de bombeamento e trocadores de calor a placas que utiliza água como fonte fria.

### 5.5.2 Centrifugação

A centrifugação é um processo de separação de misturas líquido-líquido heterogêneas, que utiliza a diferença de densidade dos elementos que a compõem para promover a separação.

O fermento, que será reutilizado na produção após tratamento especial, é separado do vinho em equipamentos rotativos denominados de centrífugas de levedo. Estes equipamentos usam o mesmo princípio da força centrífuga para fazer a separação, como o fazem as centrífugas de açúcar, mas diferem-se construtivamente das mesmas, sendo mais complexos, delicados e de difícil manutenção. São de operação contínua e acionados por motor elétrico de média potência (100 HP), girando em alta rotação e velocidade constante.

Os produtos da centrifugação são o fermento, também chamado de levedo, e o vinho delevurado, que contém o álcool.

O levedo é conduzido por gravidade e tubulações de aço inox, até cubas especiais providas de agitador mecânico denominadas de cubas de tratamento de fermento, onde é tratado em meio ácido (pH 2,8) com água limpa, ácido sulfúrico e dependendo da quantidade de microorganismo (infecção), com bactericida.

O vinho é enviado através de sistema de bombeamento e tubulações de aço inox para as colunas de destilação.

Na figura 17 segue o fluxograma da fermentação.

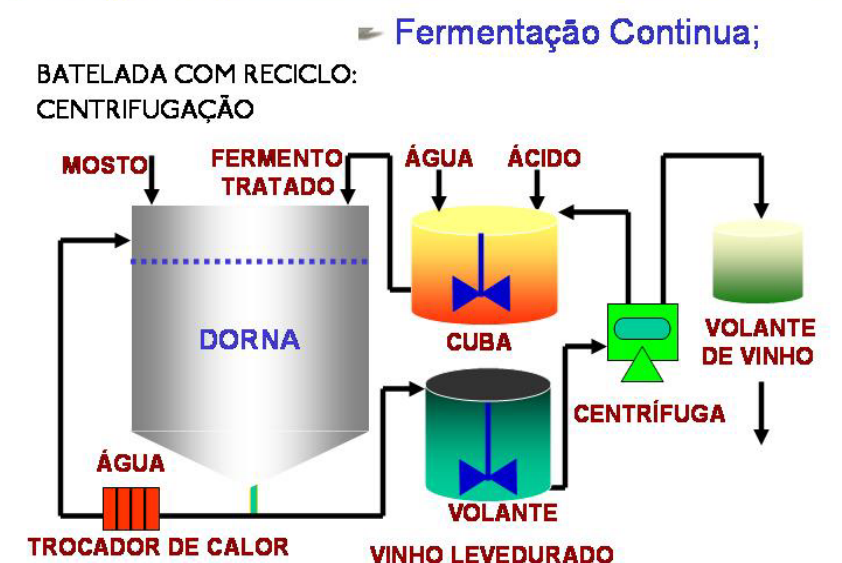


Figura 17: Fluxograma de Fermentação.

### 5.5.3 Destilação alcoólica

Segundo Marafante (1993, p. 135), a destilação é um processo de separação de misturas líquido-líquido homogêneas, que utiliza a diferença do ponto de ebulição dos elementos que a compõem para promover a separação.

No caso, o álcool, que tem ponto de ebulição inferior ao da mistura aquosa, evapora com mais facilidade, apesar de desprender concomitantemente uma parcela considerável de água.

Assim a destilação total utiliza uma seqüência de destilações parciais que aumentam a porcentagem de álcool nos vapores, até atingir um ponto técnico econômico viável de concentração definido para o álcool hidratado como sendo 96,4% em volume, (Figura 18 e 19).

O equipamento usado na destilação alcoólica, é formado basicamente por três colunas de destilação conhecidas como, colunas A, B e C.

São construtivamente semelhantes, e compostas de cilindros metálicos de aço inox denominados de gomos sobrepostos na posição vertical e aparafusados entre si, formando uma unidade compacta denominada de coluna.

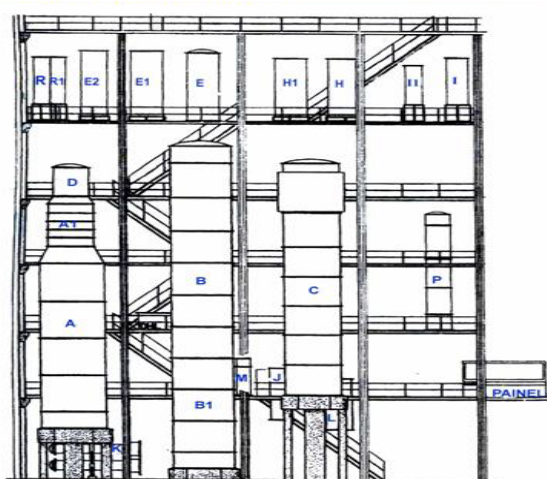
Os gomos são divididos por bandejas especiais perfuradas providas de calotas ou canecas invertidas, com a função de promover o contato entre o vapor desprendido na bandeja imediatamente abaixo, com a mistura líquida alcoólica mais concentrada da bandeja imediatamente acima, e assim sucessivamente.

Em média a coluna A é formada por 20 bandejas de 116 canecas cada, enquanto que as colunas B e C possuem 42 bandejas de 88 canecas.

O vinho, com uma concentração média de 8 % (v/v), é bombeado para a bandeja n.º 16 da coluna A, enquanto que o vapor de processo na forma de contato direto (borbotagem) ou indireto (reboiler), é injetado logo abaixo da bandeja n.º 1 na base da coluna.

O fluxo da mistura líquida é descendente e perde concentração bandeja a bandeja, até chegar à base da coluna com praticamente zero de álcool, formando um resíduo, denominado de vinhaça ou vinhoto, que é bombeado para a lavoura, após resfriamento em torres especiais, para ser usado como adubo orgânico.

Através de trocadores de calor do tipo casco-tubos, que usam água como fonte fria, os vapores de álcool, provenientes do topo da coluna B, são liquefeitos formando o álcool hidratado, o qual é resfriado a aproximadamente 30 °C, em resfriadores verticais a água e então enviado para os depósitos como álcool hidratado pronto para a distribuição.



### APARELHO DE DESTILAÇÃO

É um conjunto de colunas e troncos com seus respectivos condensadores e acessórios, interligados estrategicamente, de maneira a se produzir álcool dentro de especificações pré estabelecidas. São constituídas por uma serie de caldeiras de destilação superpostas, as quais recebem a denominação de bandejas. A reunião de duas ou mais bandejas de destilação forma um gomo, que se liga a outros por meio de flanges.

Figura 18: Aparelho de destilação.

## APARELHO DE DESTILAÇÃO

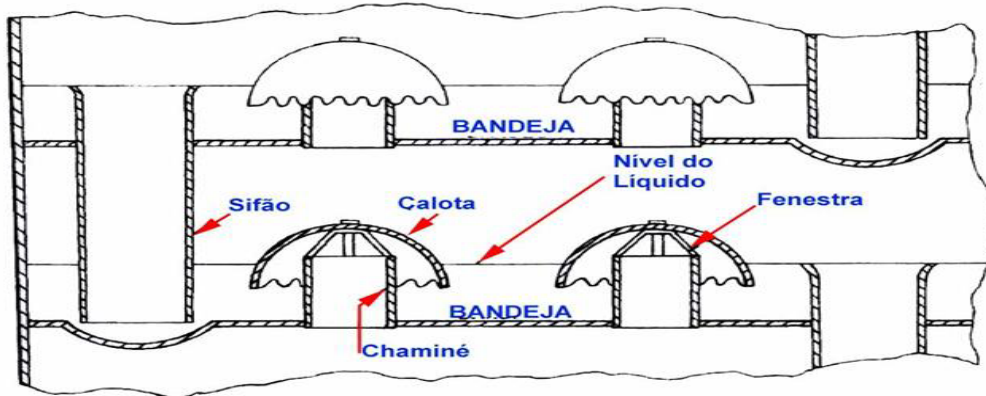


Figura 19: Interno de um aparelho de destilação.

## 6. Geração de vapor e energia elétrica (Cogeração)

A cogeração é definida como sendo a produção simultânea de energia elétrica ou mecânica e energia térmica a partir de uma fonte primária de energia tal como bagaço de cana, cavaco de madeira, óleo combustível, gás, palha de arroz, etc. É uma técnica que permite uma maior utilização da disponibilidade termodinâmica dos combustíveis.

Segundo Balestiri (2002), os primeiros relatos de aplicação da cogeração aparecem na Europa no século 14 em ilustrações alemãs de 1.350 em sistemas de trabalho mecânico de elevação denominados *smokejacks* (Figura 20). O sistema tem o princípio básico de uma turbina movida pelo ar quente que sobe por uma chaminé.

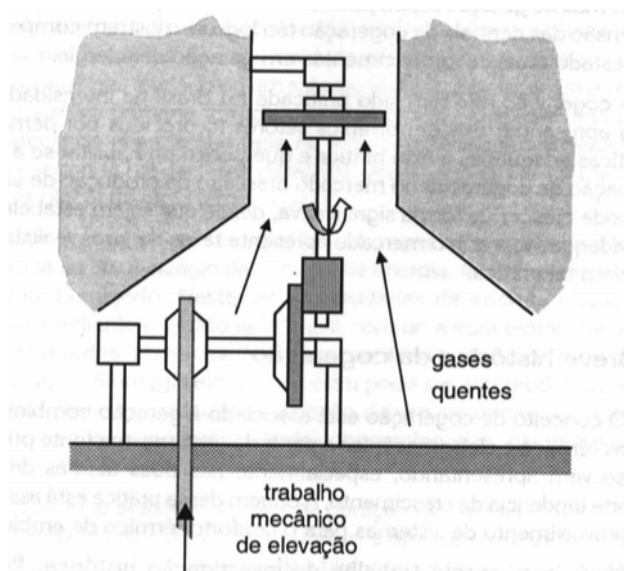


Figura 20: - Smokejack - Sistema de elevação a partir de gases quente

As primeiras aplicações da cogeração para geração de energia elétrica aparecem em meados de 1870 (Balestiri, 2002) através de máquinas a vapor de eixo alternativo acopladas a um gerador, em áreas de grande concentração urbana. A aplicação da época estava relacionada com a geração de calor para aquecimento de ambientes.

Muitos são os países no mundo que usam a técnica de cogeração para geração de eletricidade, como parte de suas matrizes energéticas.

### 6.1. Tipos de Ciclos de Cogeração.

Cogeração é dividida basicamente em dois grandes grupos, segundo o tipo de ciclo empregado, que podem ser: ciclo topping e ciclo bottoming.



### 6.1.1. Cogeração Tipo Topping.

Este tipo de cogeração consiste na utilização do combustível para produção de energia elétrica e ou mecânica, por exemplo, usando-se turbinas a vapor de contrapressão. O vapor que sai da turbina (vapor de escape) possui calor residual para ser utilizado em um processo produtivo (Figura 21). Este tipo de cogeração é típico das usinas de açúcar e álcool.

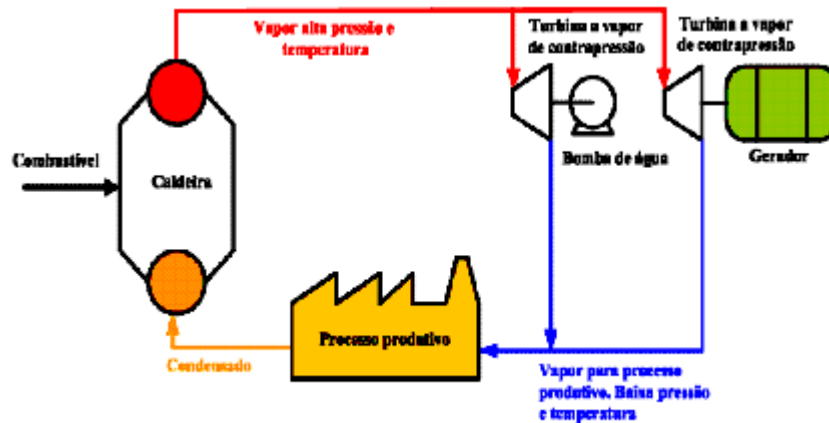


Figura 21: Cogeração Tipo Topping.

### 6.1.2. Cogeração Tipo Bottoming.

Neste caso a energia do combustível é utilizada diretamente no processo produtivo (Siderúrgicas, produção de vidro, refratário). O calor residual do processo produtivo possui alta temperatura, permitindo por exemplo, através de uma caldeira de recuperação, produzir vapor e usando-se turbinas a vapor de condensação produzir energia elétrica e ou mecânica (Figura 22).

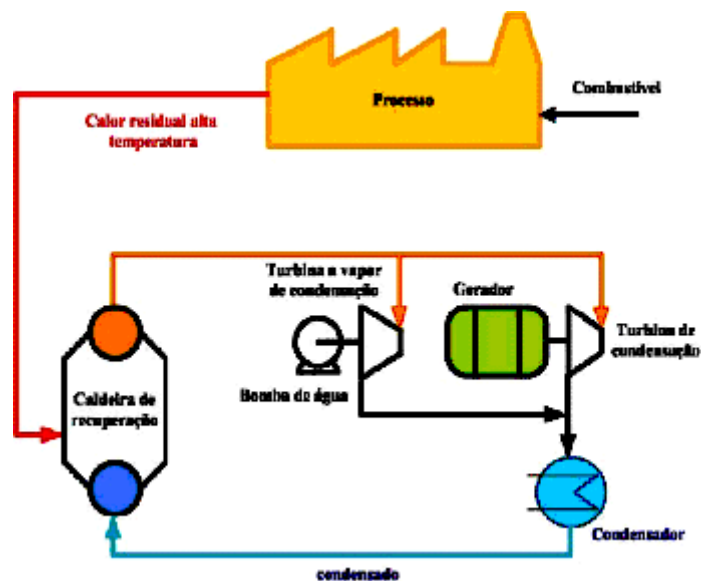


Figura 22: Cogeração Tipo Bottoming.

O ciclo de cogeração em uma usina de açúcar e álcool é do tipo topping e possui como combustível os resíduos da cana de açúcar, ou seja, bagaço e palha. A palha ainda é pouco utilizada mas já faz parte dos estudos de novos projetos de cogeração, permitindo maior oferta de energia elétrica, inclusive durante o período de entressafra quando as usinas param para manutenção.

A Figura 24 representa esquematicamente e de forma simplificada, o ciclo do vapor de uma usina açúcar e álcool. A cana de açúcar depois de esmagada na moenda onde é extraído o caldo para a produção de açúcar e álcool, tem como resíduo o bagaço que é enviado para a caldeira e queimado para a produção de vapor. Havendo excedente de bagaço, o mesmo é armazenado, retornando para a caldeira quando necessário.

- vapor gerado a uma pressão de 21 Kg/cm<sup>2</sup> e temperatura de 300 °C (vapor superaquecido) produz energia mecânica e elétrica através de turbinas a vapor de contrapressão, das quais o vapor sai a uma pressão de 1,5 Kg/cm<sup>2</sup> e temperatura de 130 °C. O vapor da saída das turbinas, chamado de vapor de escape, fornece a energia necessária (calor) para o processo produtivo de açúcar e álcool. Este vapor, como mostra o diagrama, é utilizado para aquecimento do caldo extraído da cana, para evaporação da água do caldo aumentando sua concentração de açúcar, nos cozedores onde caldo concentrado (xarope) forma os cristais e na destilaria onde é fabricado o álcool. No final de cada processo o vapor é condensado e retorna para as caldeiras.

- ciclo de operação de uma usina de açúcar e álcool é composto de safra e entressafra. Na região sudeste o ciclo ocorre tipicamente de maio a abril do ano seguinte. De maio a dezembro ocorre o período de safra (produção) e de janeiro a abril do ano seguinte a entressafra (ocorre a parada da produção para manutenção da planta).

- ciclo de operação de uma usina de açúcar e álcool é composto de safra e entressafra. Na região sudeste o ciclo ocorre tipicamente de maio a abril do ano seguinte. De maio a dezembro ocorre o período de safra (produção) e de janeiro a abril do ano seguinte a entressafra (ocorre a parada da produção para manutenção da planta).

Válvulas de alívio de pressão: são válvulas de segurança, ajustadas de acordo com a pressão de operação da rede de vapor, evitando que a pressão ultrapasse limites de segurança.

## *6.2. Balanço de Massas.*

O balanço de massas representa o equilíbrio entre a vazão do vapor utilizado para geração de energia motriz e o vapor necessário para o processo produtivo. Em uma planta de

cogeração, caso das usinas de açúcar e álcool este é um fator de extrema importância. Um desequilíbrio no balanço de massa representa perda de eficiência, ou seja, de energia.

No diagrama da Figura 23, as válvulas 1, 2 e 3 são necessárias por questões de segurança e para absorver oscilações do processo produtivo, como por exemplo, a parada de uma moenda. Do ponto de vista energético, o ideal é que elas permaneçam fechadas, o que significa um equilíbrio entre o vapor utilizado para força motriz e o consumido no processo. Nesta condição todo o vapor destinado ao processo produtivo está passando por uma turbina a vapor, ou seja, realizando trabalho (cogeração).

A atuação de qualquer uma das válvulas significa desperdício de energia. As válvulas de alívio de pressão, quando ocorrem aberturas (2 e 3), há um grande desperdício de energia por lançar vapor direto para a atmosfera sem nenhum aproveitamento. A válvula redutora de pressão do vapor (1), embora não jogue o vapor para a atmosfera, supre as necessidades de vapor do processo rebaixando a pressão e temperatura do vapor sem realizar trabalho, ou seja, sem realizar cogeração. Válvula redutora de pressão ou suplementação: quando a vazão de vapor necessária para o processo produtivo é maior que a vazão através das turbinas a vapor, a mesma realiza a suplementação da vazão.

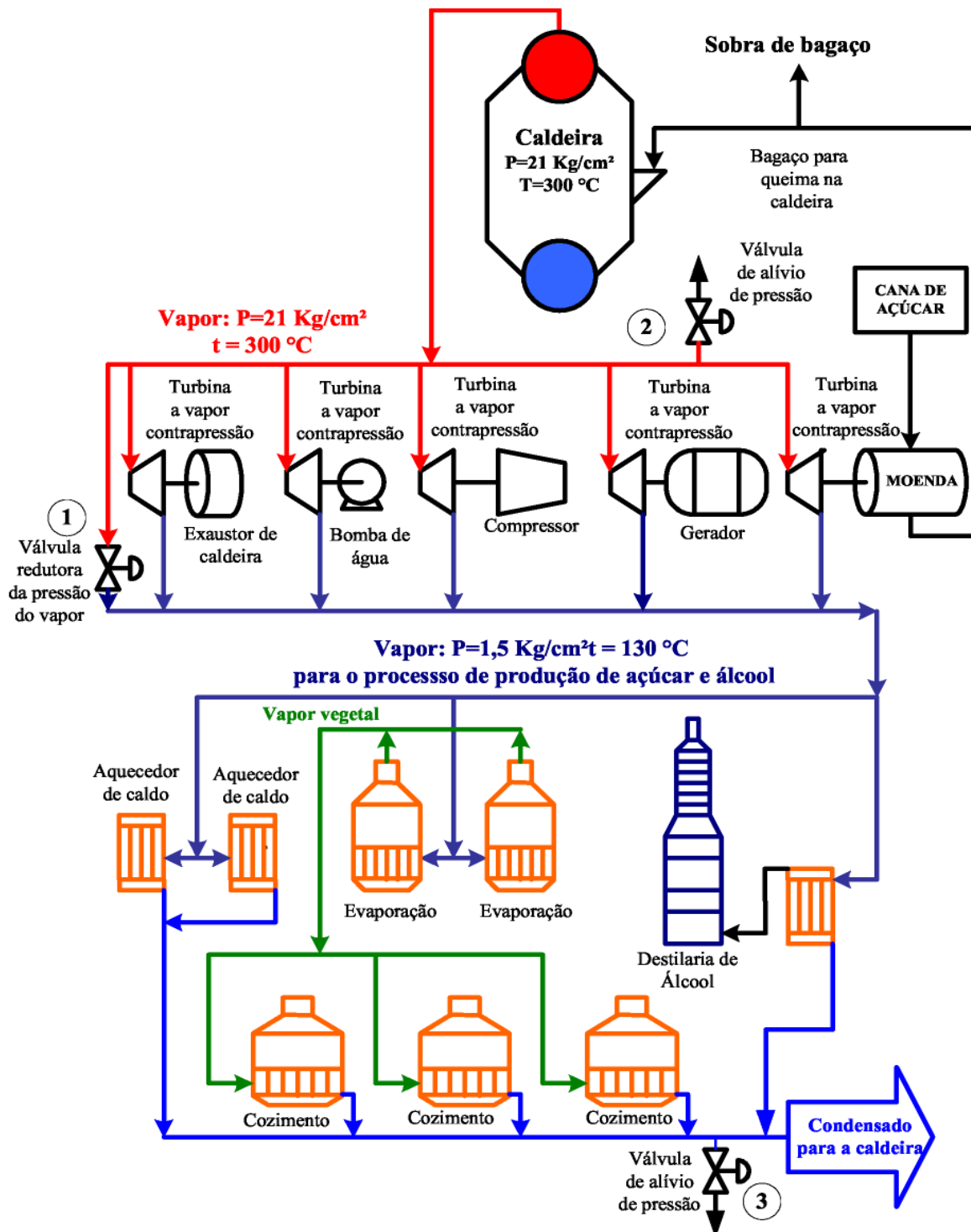


Figura 23: Fluxograma típico do vapor (cogeração) de uma usina de açúcar e álcool

### 6.3.Referencias Mundiais.

No mundo existem 70 países produtores de cana de açúcar (CARPIO et al, 1999). Com tecnologias modernas e um índice de eletricidade excedente de 50 kWh por tonelada de cana permitiria na América Latina e Caribe uma produção de 20.700 GWh. Porém de acordo com

estudos mais recentes e de acordo com a tecnologia disponível, utilizando caldeiras de alta pressão de vapor (80 Kg/cm<sup>2</sup> e 450 °C), turbinas de condensação e extração de alto rendimento e no processo produtivo um consumo específico de 340 Kg de vapor por tonelada de cana, o índice de eletricidade excedente pode chegar de 80 a 100 kWh por tonelada de cana.

Além dos trabalhos visando implementações tecnológicas o nível de equipamentos (caldeiras, turbinas, etc.), outros estão sendo realizados visando alternativas de combustíveis para complementação do bagaço buscando um melhor aproveitamento das instalações da planta de cogeração durante o período de entressafra. O maior potencial encontra-se em outro resíduo da cana de açúcar que é a palha resultante da colheita da mesma na lavoura, porém, outras alternativas tem sido utilizadas como por exemplo o carvão na Ilhas Maurício (NOEL, 1994) e madeira de eucalipto na Nicarágua (BROEK, 2000). A melhor alternativa depende de condições particulares de cada país ou região.

O bagaço da cana de açúcar é a principal fonte energética das usinas, permitindo que a maioria das unidades sejam auto-suficientes durante o período de safra produzindo energia mecânica, elétrica e calor para o processo produtivo, ou seja, fazendo uso da cogeração.

Com a queima do bagaço em caldeiras produz-se vapor a alta pressão que através de turbinas a vapor de contrapressão produz energia mecânica para acionamento de moendas, bombas de água e exaustores de caldeiras e acopladas a geradores produz energia elétrica. O vapor de saída das turbinas a vapor (vapor de escape) possui calor residual que é utilizado no processo produtivo de açúcar e álcool.

No tocante a produção de energia elétrica, segundo Souza e burnquest (2000), a potência de cogeração instalada no setor sucroalcooleiro seria de 995 MW mas, apenas 700 MW estariam sendo produzidos sendo aproximadamente 660 MW para consumo próprio e 40 MW sendo comercializados junto as concessionárias de energia. Em 1987 (Souza, 1987) foi realizado o primeiro contrato de venda de energia elétrica gerada pelo setor sucroalcooleiro entre a Usina São Francisco e Companhia Paulista de Força e Luz.

No Brasil, de 1987 a 1998 a energia elétrica cogerada pelas usinas cresceu 106,38%, somando-se a energia para consumo próprio e comercializada com as concessionárias. O gráfico (figura 24), mostra a evolução da geração de energia elétrica do setor de 1982 a 1998.

Segundo o livro Atlas de Energia Elétrica do Brasil 2002 (ANEEL, 2002) o potencial de cogeração de excedentes de energia elétrica no setor sucroalcooleiro é de 3.851 MW considerando tecnologias eficientes e disponíveis comercialmente no Brasil. Até setembro de 2001 apenas 3,4% (133 MW) do referido potencial brasileiro estava sendo comercializado.

Dados apontam perspectivas de 1.578 MW em novos projetos sendo 348 MW em curto prazo (2002), 772 MW em médio prazo (2003-2004) e 458 MW à prazo (à partir de 2005).

Para que a comercialização de energia elétrica cogorada acontecesse, foram necessárias mudanças na legislação e uma reestruturação do setor elétrico nacional que vem ocorrendo desde 1981 (CLEMENTINO 2001). O primeiro passo foi o Decreto-Lei nº 1.872 de 21 de maio de 1981, posteriormente regulamentado pela portaria do DNAEE 084 de 22 de outubro de 1981 (SILVA, 1987), que criava a oportunidade de comercialização de energia elétrica excedente de autoprodutor.

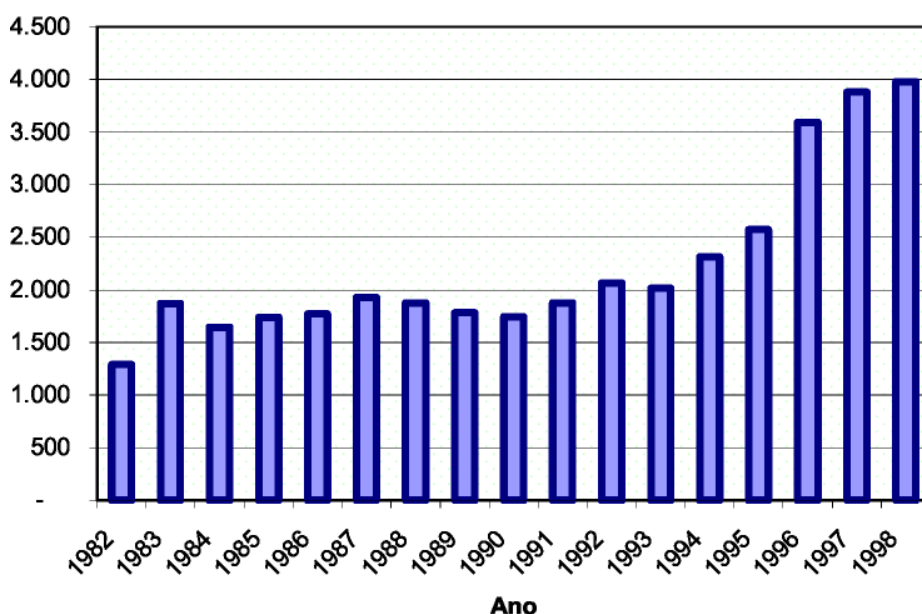


Figura 24: Evolução da geração de energia elétrica do setor de 1982 a 1998

A criação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) através da Lei nº 10.438 de 2002 do MME (Brasil, 2002) é a mais recente e importante medida visando implementar a geração de energia elétrica através de biomassa, eólica e PCH. Em sua primeira etapa o programa prevê a implantação de 3.300 MW de capacidade sendo 1.100 MW para biomassa, 1.100 MW para eólica e 1.100 MW para PCH, para instalações com início de funcionamento previsto para até 30 de dezembro de 2006. O programa também assegura a compra da energia produzida no prazo de quinze anos a partir da entrada em operação da central energética.

Em sua segunda etapa, atingida a meta de 3.300 MW o PROINFA será desenvolvido de forma que as fontes biomassa, eólica e pequenas centrais hidroelétricas tenham um participação de 10% do consumo anual de energia elétrica do país, através de contratos celebrados pela

Eletrobrás, com prazo de duração de 15 anos.

A Tabela 1 apresenta uma cronologia e síntese das principais mudanças na legislação do setor elétrico brasileiro, importantes para a cogeração no setor sucroalcooleiro.

Segundo Souza e Burnquest (2.000), a reestruturação do setor elétrico brasileiro teve início em 1.990 com o Plano Nacional de Desestatização, porém, somente em 1.995, ocorreu o início da reestruturação do setor elétrico nacional com o começo das privatizações das empresas ligadas ao setor (Tabela 2).

Tabela 1– Síntese e cronologia da legislação importante para a cogeração no setor sucroalcooleiro.

Documento	Ementa
Decreto 1872 do MME de 21/05/1981	Dispõe sobre a aquisição, pelas concessionárias de energia elétrica, de excedente de energia elétrica gerada por auto produtor.
Portaria do DNAEE nº 246 de 26/12/1988.	Autoriza os concessionários de Serviço Público de Energia Elétrica, integrantes dos sistemas elétricos interligados, a adquirir energia elétrica excedente de autoprodutores.
Alterada pela Portaria do DNAEE 094 de 13.06.1989	Cria o Comitê Executivo, junto ao Gabinete do Secretário de Energia, do Programa de Produção de Energia Elétrica do Setor Sucroalcooleiro de São Paulo.
Decreto Estadual nº 37.234 (SP)	Institui a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica.
Lei do /12 MME nº 9.427 de 26/1.996.	Regulamenta a produção de energia elétrica por Produtor Independente e por Autoprodutor
Decreto do MME nº 2.003 de 10/09/1.996.	Estabelece as condições relativas à contratação de energia elétrica pelos consumidores livres.
Resolução da ANEEL nº 264 de 13/08/1.998.	Determina que a Centrais Elétricas Brasileiras S/A - ELETROBRÁS promova chamada pública para identificação dos excedentes de energia elétrica provenientes de co-geração, com o objetivo de sua comercialização a curto prazo
Portaria do MME nº 227 de 02/07/1.999. Lei do MME nº 10.438 de 26/04/2002.	Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária, cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), dispõe sobre a universalização do serviço público de energia elétrica.



Tabela 2 - Empresas estatais do setor de energia elétricas privatizadas de 1995 a Agosto/2000

<b>Empresa</b>	<b>Data da privatização</b>
Escelsa	11/07/1.995
Light	21/05/1.996
CERJ	20/11/1.996
Coelba	31/07/1.997
Cachoeira Dourada	05/09/1.997
AES Sul	21/10/1.997
RGE	21/10/1.997
CPFL	05/11/1.997
Enersul	19/11/1.997
Cemat	27/11/1.997
Energine	03/12/1997
Cosern	12/12/1.997
Celce	02/04/1.998
Eletronaulo/Metropolitana	15/04/1.998
Celba	09/07/1998
Elektro	16/07/1998
Gerasul	15/09/1998
EBE – Bandeirantes	17/09/1998
CESP Paranapanema	28/07/1.999
CESP Tietê	27/10/1.999
Celne	17/02/2.000
Cia Energética Maranhão	15/06/2.000

Para o Ministério de Minas e Energia, os resultados da reestruturação brasileira podem ser resumidos em quatro frentes de trabalho:

- i. Criação de um órgão regulador independente e autônomo: criou-se a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL);
- ii. Expansão do sistema e da oferta de eletricidade: retomaram-se as obras paralisadas, ocorreu a licitação de novas hidrelétricas e autorizou-se a interligação para a compra e venda de energia de países vizinhos;
- iii. Privatização da área de distribuição de eletricidade: o processo de privatização foi iniciado com a privatização da Escelsa do Estado de Espírito Santo, em julho de 1.995;
- iv. Detalhamento do modelo de mercado: contratou-se a empresa Coopers & Lybrand para apresentar uma proposta da nova estrutura do setor elétrico.

#### 6.4. Produção de Energia Elétrica Através da Cogeração na Indústria da Cana-de-açúcar e o Meio Ambiente.

Segundo trabalho realizado pela FIESP /CIESP (2.001) a produção de energia a partir do bagaço de cana, quando gerenciada com cuidados ambientais, tende a ser melhor aceita por ser renovável, de caráter sustentável, com resíduos reaproveitáveis, e de inserção adequada na questão de emissões de gases do efeito estufa. Ambientalistas representantes das organizações não governamentais (ONGs) SOS Mata Atlântica (Mário Mantovani) e Greenpeace, aprovaram a produção de energia pelo bagaço de cana, considerando-a ambientalmente adequada, por possibilitar a captura do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) emitido no processo de geração de energia com o próprio cultivo da cana de açúcar, através da fotossíntese. As alterações ambientais e os impactos (alterações significativas) desencadeados nas diferentes etapas do sistema de geração de energia do bagaço, desde o cultivo da cana até a colocação da energia na subestação da distribuidora, são diversificados e necessitam ser previstos e amenizados. A cana de açúcar é uma das plantas mais eficientes na realização da fotossíntese, ou seja, possui uma grande capacidade de fixar e capturar CO<sub>2</sub>.

A queima de resíduos da cana-de-açúcar produzem substancial liberação de carbono na forma de CO<sub>2</sub>. Entretanto no balanço do caso de biomassa, o resultado é praticamente nulo, pois através da fotossíntese, a biomassa queimada é repostada no ciclo seguinte da cultura. A Tabela 3 faz uma comparação das emissões de CO<sub>2</sub> na geração de energia elétrica entre biomassa e combustíveis fósseis.

Tabela 3 - Emissão de CO<sub>2</sub> por tipo de combustível

<b>Tipo de combustível</b>	<b>Emissões (kg CO<sub>2</sub>/kWh)</b>	<b>Condições</b>
Cana de Açúcar	0,057 – 0,11	Ciclo completo incluindo energia indireta dos equipamentos e insumos
Madeira	0,0465	Ciclo completo incluindo energia indireta dos equipamentos e insumos
Óleo Combustível	0,85	Somente queima de combustível
Gás Natural	0,38	Somente queima de combustível

### *6.5. Equipamentos utilizados no processo de cogeração de uma usina de açúcar e álcool.*

Os principais equipamentos que compõe o processo de cogeração em uma usina de açúcar e álcool são caldeiras, turbinas a vapor, geradores. Nas caldeiras o bagaço da cana de açúcar é queimado para a produção de vapor a alta pressão e temperatura (21 kg/cm<sup>2</sup> a 300 °C, 42 kg/cm<sup>2</sup> a 400 °C, 64 kg/cm<sup>2</sup> a 450 °C, por exemplo) para acionamento das turbinas a vapor, produzindo energia mecânica ou elétrica e o calor residual do vapor (1,5 kg/cm<sup>2</sup> e 130 °C) na saída da mesma, utilizado no processo produtivo de açúcar e álcool.

Em função das várias possibilidades de otimização de uma planta de cogeração, de forma indireta, motores elétricos ganham importância pela possibilidade de substituírem turbinas a vapor de baixo rendimento, aplicadas no acionamento de moendas, exaustores, bombas, etc.

#### *6.5.1. Caldeiras*

Segundo (Macintyre, 1997) caldeiras ou geradores de vapor d'água são equipamentos destinados a mudar o estado da água, do líquido para o de vapor, a fim de ser usado em aquecimento, em processos industriais, no acionamento de máquinas motrizes (turbinas a vapor para acionamento de geradores, bombas de água, etc), etc. Podem ser elétricas ou a combustíveis (gás, óleo combustível, bagaço e palha da cana, madeiras, etc).

##### *6.5.1.1. Histórico.*

Segundo Babcock&Wilcox (1978), a primeira descrição de uso de vapor de água é descrita por Heron de Alexandria, provavelmente no 1º século D.C.. Ele apresenta um equipamento que ficou conhecido como A Máquina de Heron (Figura 25), composta de uma caldeira e uma esfera oca apoiada em dois mancais sendo um deles para conduzir o vapor da caldeira para o interior da esfera que sai da mesma através de dois tubos diametralmente opostos provocando seu movimento giratório. Heron, na descrição de seu invento não apresentou uma sugestão para aplicação do mesmo. A Máquina de Heron é também uma antecessora da turbina a vapor.

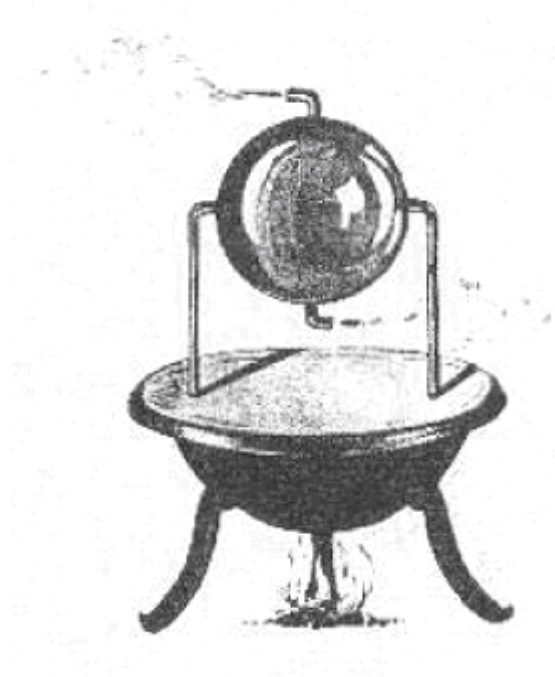


Figura 25: Máquina de Heron (turbina a vapor)

Segundo Babcock&Wilcox (1978)<sup>0</sup>, não existem relatos de uso prático de caldeiras a vapor antes do século XVII, embora existam trabalhos publicados sobre geração de vapor no final do século XVI.

A fonte mais comum de vapor no início do século XVIII era uma caldeira tipo “concha”, verdadeiras chaleiras cheias de água aquecidas por baixo, Figura 26.

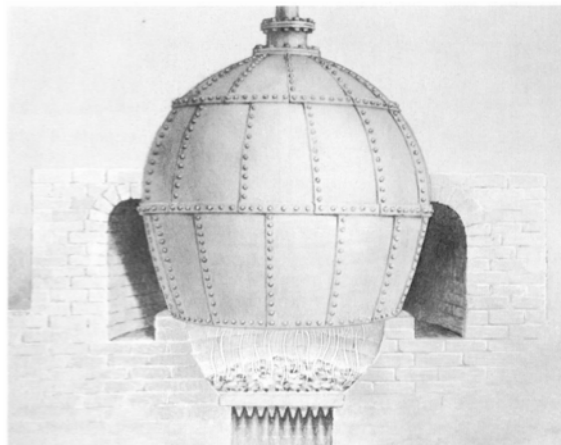


Figura 26- Caldeira tipo concha

A primeira máquina a vapor comercializada com sucesso foi patenteada em 1.698 por

Thomas Savery que embora muito primitiva foi usada para bombear água em minas de carvão. Também com a finalidade de bombear água em minas de carvão, em 1711 Newcomen apresentou sua máquina a vapor (Figura 27), uma versão mais otimizada que operava automaticamente.

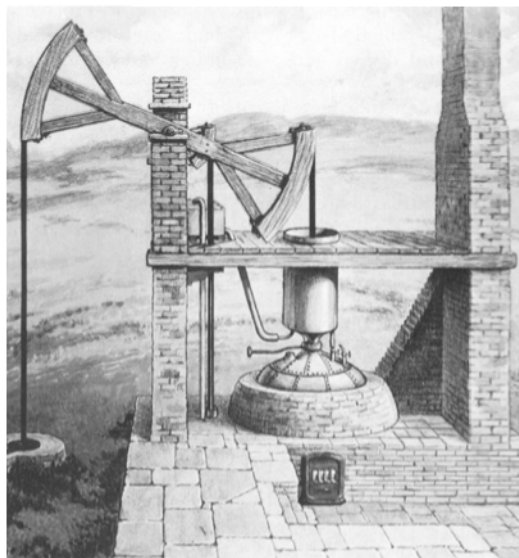


Figura 27 - Caldeira de Newcomen 1711

Um dos grandes nomes envolvidos com o uso do vapor d'água foi, indubitavelmente, o de James Watt, grande engenheiro e fabricante de instrumentos da cidade de Glasgow, o qual começou a atuar nesse ramo através de aperfeiçoamentos que introduziu nos então recentes inventos de caldeiras e máquinas a vapor. Em 1769, ele patenteou vários desses aperfeiçoamentos. Seu nome se encontra diretamente ligado à Revolução Industrial do século XVIII. Podemos considerar que, depois que James Watt plantou as bases do desenvolvimento do uso do vapor, durante a segunda metade do século XVIII, o século XIX foi o período da grande arrancada, para que o vapor d'água ocupasse lugar de destaque, como elemento importante dentro do cenário industrial.

Logo de início, por volta de 1800, surgiram dois nomes: Richard Trevithick, na Inglaterra, e Oliver Evans, na América. Ambos introduziram máquinas a vapor de alta pressão, não condensantes. Evans logo se distinguiu por se envolver com locomotivas e navegação a vapor.

A consolidação do uso do vapor atingiu o seu auge no século XX. Desde 1900 até o período da I Guerra Mundial, as pressões de vapor utilizadas nas centrais termelétricas maiores foram gradualmente sendo aumentadas. Por volta de 1914, era comum encontrar turbinas operando com pressões entre 18 kg/cm<sup>2</sup> e 19,5 kg/cm<sup>2</sup> e temperaturas de 295 °C.

Um grande salto foi dado nos anos de 1924 e 1925, nos Estados Unidos, com o projeto e

a colocação em operação de uma caldeira para 1200 psi (84,5 Kgf/cm<sup>2</sup>), na Estação Edgar da Boston Edison Company. Essa caldeira foi construída para acionar uma turbina de 3.150 KW a 3600 RPM, fornecendo aproximadamente 72 toneladas de vapor por hora a uma temperatura de 371° C.

Conforme (Mataruna, 2003), no início do século XIX, todas as máquinas a vapor, caldeiras e afins em uso no Brasil e no resto do mundo eram importadas da Inglaterra, único fabricante até então. A indústria que começou a usá-las foi a de produção de açúcar, tanto no Brasil como nas Antilhas, principalmente em Cuba. Têm-se notícia que em 1819, chegou em Havana a primeira máquina a vapor fabricada nos Estados Unidos da América. A partir da década de 1820, Cuba só obtinha suas máquinas nos Estados Unidos, e por isso, suas indústrias se instalaram na costa ocidental daquela ilha. Cuba se tornou grande fornecedor de açúcar para os Estados Unidos.

Em 1957 foi instalada a primeira caldeira construída no Brasil, na Usina Santa Tereza, no Estado de Pernambuco, fabricada pela Companhia Brasileira de Caldeiras sob licença da Combustion Engineering Inc. – USA (Peres, 1982).

#### *6.5.1.2. Classificação das Caldeiras.*

As caldeiras a combustíveis podem ser classificadas em dois grandes grupos conforme o modo de transferência de calor para vaporizar a água, ou seja, flamotubulares e aquatubulares.

##### *. Caldeiras Flamotubulares.*

Nas caldeiras flamotubulares ou fogotubulares (Figura 28) os gases quentes da combustão circulam no interior de tubos que atravessam o reservatório de água a ser aquecida para produzir vapor. Esse tipo de caldeira, geralmente de pequeno porte, é utilizada apenas para pressões e vazões de vapor reduzidas. Segundo Pera (1990) sua aplicação está limitada à pressão de 16 kg/cm<sup>2</sup> e vazão de 15 t/h. Ainda é muito utilizada em instalações de pequeno porte (vazões de até 7 t/h) em razão do seu baixo valor de investimento comparado com as caldeiras aquatubulares, e da facilidade de manutenção. Utiliza qualquer tipo de combustível, líquido, sólido ou gasoso. É muito comum o seu uso com óleo e gás.

Segundo Peres (1982), nas usinas de açúcar brasileiras, na década de 30 a 40, as caldeiras fogotubulares foram substituídas por caldeiras aquatubulares.

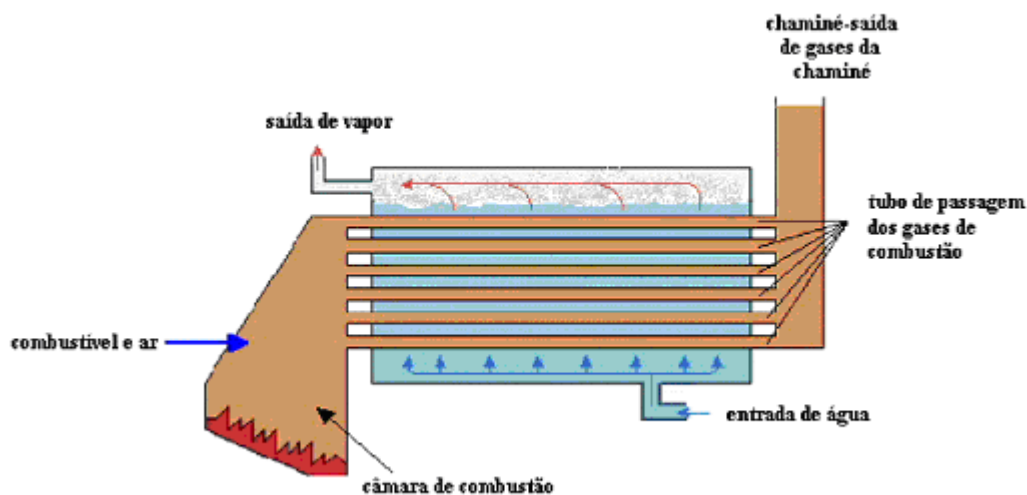


Figura 28: Caldeira Flamotubulares

#### . Caldeiras Aquatubulares.

Nas caldeiras aquatubulares (Figura 29) a água a ser aquecida passa no interior de tubos que por sua vez são envolvidos pelos gases de combustão. Os tubos podem estar organizados em feixes como nos trocadores de calor e as caldeiras que os contêm apresentam a forma de um corpo cilíndrico ou em paredes de água como nas caldeiras maiores.

Segundo Pera (1990) somente foi possível a obtenção de maiores produções de vapor, a pressões elevadas e altas temperaturas com o advento das caldeiras aquatubulares. Encontra-se caldeiras de grande porte com capacidade de 750 tv/hora, pressão de 200 kg/cm<sup>2</sup> e temperatura do vapor de 500 °C.

No Brasil, as caldeiras aquatubulares utilizadas no setor sucroalcooleiro, na sua grande maioria, operam com vapor de 21 Kg/ cm<sup>2</sup> e 300 °C de temperatura e rendimento que podem variar de 80% a 85%. Com a possibilidade da comercialização de energia elétrica, as usinas de açúcar vêm substituindo suas caldeiras por de maior eficiência e capacidade de produção. Com tecnologia nacional, atualmente são fabricadas caldeiras com rendimento de 87,5% e capacidade de produção de 100 à 300 t/h, pressão de 21 a 80 kg/cm<sup>2</sup> e temperatura de 300 °C a 510 °C.

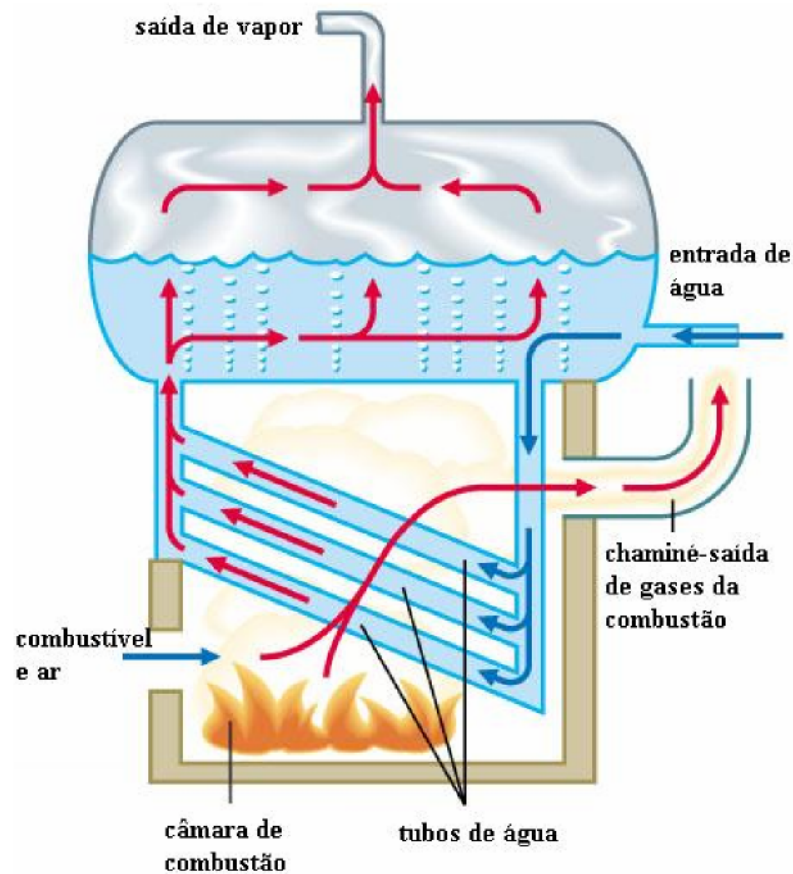


Figura 29 - Caldeira aquatubular

A combustão do bagaço de cana pode ser feita basicamente de duas maneiras, por deposição ou em suspensão.

No tipo de caldeira por deposição (Figura 30) o bagaço é depositado em fornalha, amontoado de forma cônica ou em camada regular sobre um grelhado tipo basculante ou rotativo onde recebe injeção de ar e ocorre sua queima. Este tipo de caldeira apresenta baixo rendimento e segundo Campanari (2002) esta desaparecendo das usinas de açúcar e álcool.



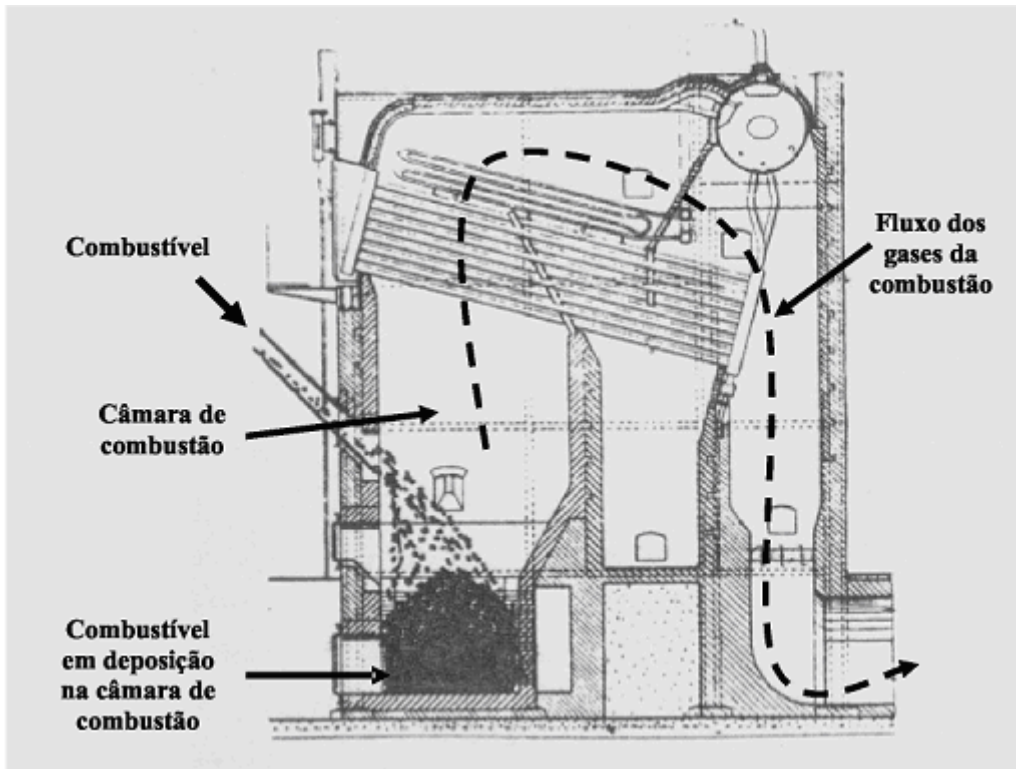


Figura 30: Caldeira com queima de combustível por deposição

### . *Queima em Suspensão*

Neste tipo de caldeira o bagaço é introduzido na fornalha através de injetores pneumáticos. Segundo Campanari (2002) os injetores são geralmente instalados nos cantos da fornalha, o que possibilita a formação de um vértice de bagaço durante a queima. A queima do bagaço em suspensão permite alto rendimento térmico (85% a 87%) e vem sendo aplicado em caldeiras de grande porte (vazões de vapor acima de 100 tv/h). A Figura 31 apresenta esquematicamente este tipo de caldeira.

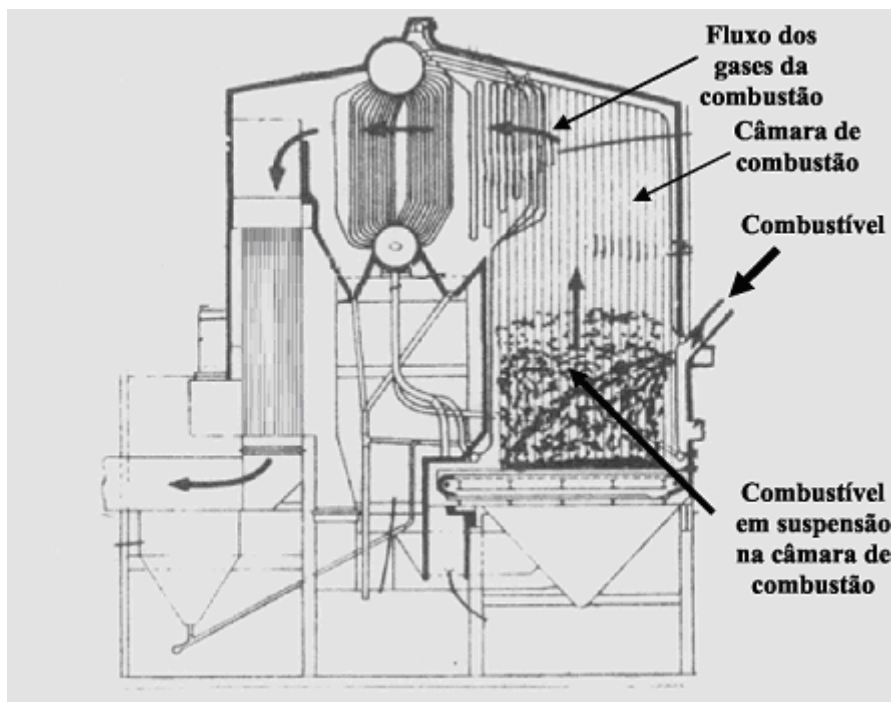


Figura 31: Caldeira com queima do combustível em suspensão.

### 6.5.1.3. Superaquecedores, Economizadores e Pré Aquecedores de Ar.

Segundo Torreira(1995) na área de geração de vapor o crescimento foi praticamente paralelo ao desenvolvimento da turbina e da exigência de vapor superaquecido e reaquecido.

A evolução tecnológica das caldeiras buscando maior rendimento e eficiência está associada à elevação das pressões e temperatura de operação através de superaquecedores e instalação de equipamentos para recuperação da energia calorífica dos gases da combustão tais como economizadores e aquecedores de ar.

A Figura 32 apresenta uma caldeira tipo AT 150, fabricação DEDIDI que ilustra a instalação de superaquecedores, economizadores e aquecedores de ar.

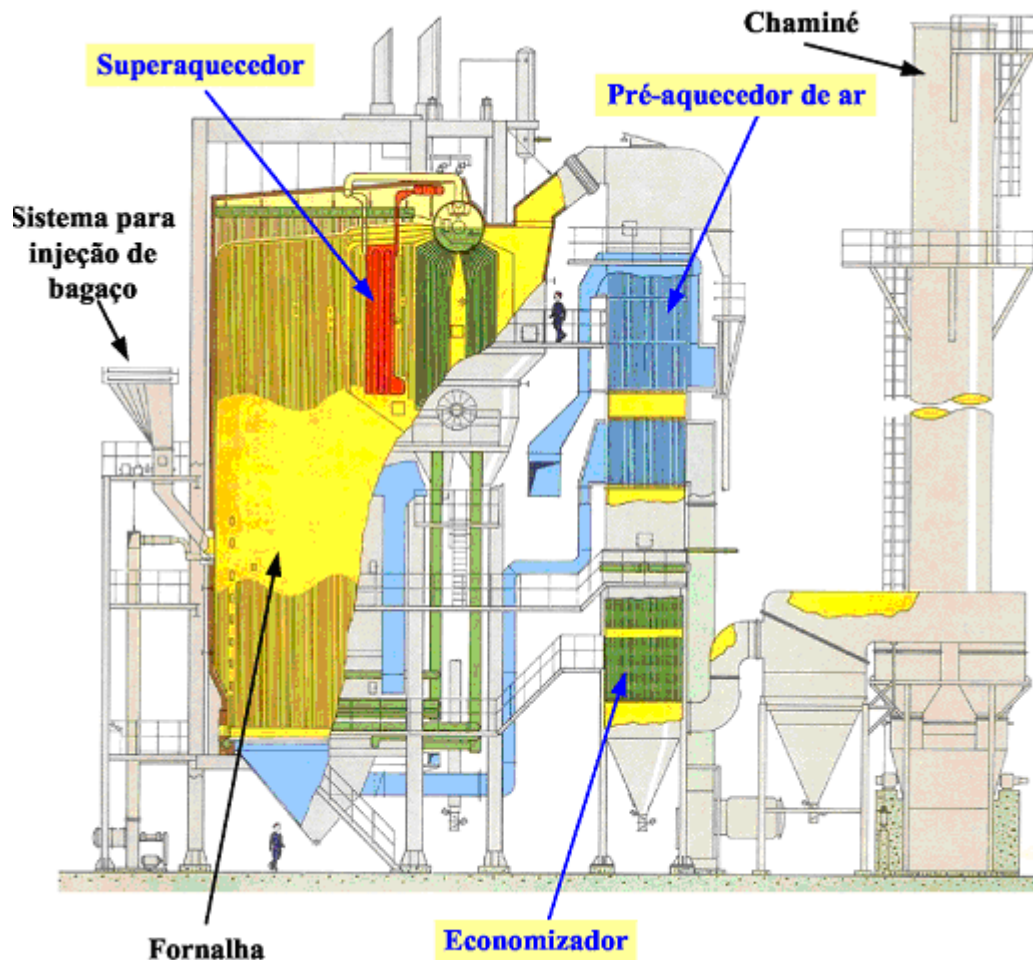


Figura 32: Caldeira tipo At 150 – Fabricante Dedini.

### . *Superaquecedores*

Os superaquecedores são trocadores de calor instalados no circuito dos gases quentes da caldeira. No interior do tambor das caldeiras o vapor formado permanece em equilíbrio com a fase líquida à temperatura de vaporização, constituindo o chamado vapor saturado. O vapor saturado ao passar pelo superaquecedor eleva sua temperatura acima da temperatura de vaporização, tornando-se superaquecido. Segundo Pera (1990), pode-se considerar um aumento de 3% no rendimento da caldeira para cada 37% de superaquecimento.

Conforme Macintyre, as vantagens da utilização do vapor superaquecido são duas: a primeira uma maior disponibilidade de energia e a segunda, um maior rendimento nas turbinas a vapor. O vapor superaquecido por ser isento de umidade evita golpes de água no rotor das turbinas, o que provocaria erosão ou quebra das palhetas, além de perdas de rendimento.

*. Economizadores*

Economizadores são trocadores de calor destinados a elevar a temperatura da água de alimentação, antes de introduzi-la no interior da caldeira, aproveitando o calor sensível ainda disponível nos gases de combustão que saem da caldeira. Para cada aumento de 10 °C na temperatura da água de alimentação das caldeiras há uma economia de 1,4% de combustível (PERES, 1982).

*. Pré-Aquecedores-de-Ar.*

Além do economizador ainda existe um outro equipamento, o pré-aquecedor de ar, que permite recuperar uma parte do calor sensível dos gases de combustão que se encaminham para a chaminé. São trocadores de calor que elevam a temperatura do ar de combustão antes de serem projetados na fornalha.

Segundo Peres (1982), a cada aumento de 38 °C na temperatura do ar de combustão, há um correspondente aumento de aproximadamente 2% na eficiência da caldeira. Dependendo do dimensionamento do pré-aquecedor de ar a economia de combustível pode variar de 5% a 10%.

*. Combustível.*

O combustível das usinas de açúcar e álcool é o bagaço da cana e a palha da cana, ainda pouco utilizada. Segundo Peres (1982), a composição física do bagaço nas usinas de açúcar e álcool no Brasil variam muito pouco de uma região para outra. Os valores médios são apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4 – Composição física do bagaço da cana de açúcar.**

Umidade	48% a 50%
Materiais Solúveis (açúcar e impurezas)	2% a 4 %
Carbono Fixo:	7%
Materiais Voláteis	41,5%
Cinzas	1,5%

A quantidade de bagaço contido na cana está diretamente relacionado com o teor de fibra celulósica da mesma podendo variar de 25% à 29%.

O poder calorífico do bagaço varia em função da umidade contida no mesmo. Em

função desta umidade considera-se, o poder calorífico inferior (PCI) que decresce em função da umidade conforme a Tabela 5.

**Tabela 5: Poder Calorífico em Função da Umidade**

Umidade %	10	20	25	30	35	40	46	48	50	52
PCI-Kcal/kg	3730	3250	3000	2760	2520	2270	1990	1890	1790	1690

### 6.5.2. Turbinas a Vapor

Conforme definido por Macintyre (1997), turbina a vapor é uma máquina motriz que utiliza a elevada energia cinética da massa de vapor expandido, fazendo com que forças consideráveis, devidas à variação de velocidade, atuem sobre palhetas fixadas em um rotor. As forças aplicadas às palhetas, determinam um momento motor resultante que faz girar o rotor. São usadas para acionamento de geradores, turbobombas, moendas, exaustores, etc.

#### 6.5.2.1. Histórico.

A primeira turbina a vapor que se tem conhecimento na história, operava pelo princípio da reação pura. Consistia basicamente de uma esfera oca, que girava em torno de um eixo horizontal, impelida por jatos de vapor que provinham de dois tubos fixados na própria esfera. A invenção dessa máquina, ocorrida provavelmente por volta do ano 50 da nossa era, é atribuída a Heron, da cidade de Alexandria, também precursor da caldeira como já mencionado.

Um outro tipo de turbina, que opera pelo princípio de ação, também chamado de impulso, foi descrito pela primeira vez em 1629 por Giovanni Branca. Essa máquina utilizava um jato de vapor dirigido para as palhetas de uma roda, promovendo a sua rotação.

Durante os anos de 1884 a 1889, o engenheiro sueco Gustav de Laval projetou e fabricou pequenas turbinas a vapor, de 1 CV (com 100.000 rpm de velocidade) a 140 CV (com 6.000 rpm). Porém a concepção moderna da turbina a vapor é atribuída a Sir Charles Parsons da Inglaterra, que em 1884, utilizando o princípio da reação, construiu uma turbina de múltiplo estágio de 10 CV de potência, que operava com velocidade de 17.000 rpm. Outros pioneiros que contribuíram para o desenvolvimento da turbina a vapor foram o francês C. E. Rateau e o norte americano C. G. Curtis.

No início do século XX os motores a vapor, que dominavam os equipamentos de acionamento mecânico da época, começaram a ser substituídos pelas turbinas a vapor, principalmente na geração de energia elétrica, as quais passaram a ter um rápido desenvolvimento, sob o comando de grandes empresas que então se estabeleciam.

No ano de 1930, tanto a GE como a Westinghouse, fabricaram turbinas a vapor com potências de 50 MW - um avanço considerado expressivo para a época. Hoje essas companhias, mais a ABB, Toshiba, Siemens, KWU e outras, constroem máquinas que chegam a produzir 1.200 MW num só eixo.

### 6.5.2.2. Classificação segundo o modo de ação do vapor sobre as paletas

#### .Turbinas de ação.

Neste tipo de turbina, o vapor é completamente expandido em uma ou mais boquilhas fixas, antes de atingir as pás do rotor. O modelo clássico é a turbina de Laval (Figura 33). Nas turbinas a vapor de ação, a velocidade de escoamento do vapor que sai das boquilhas são muito elevadas.

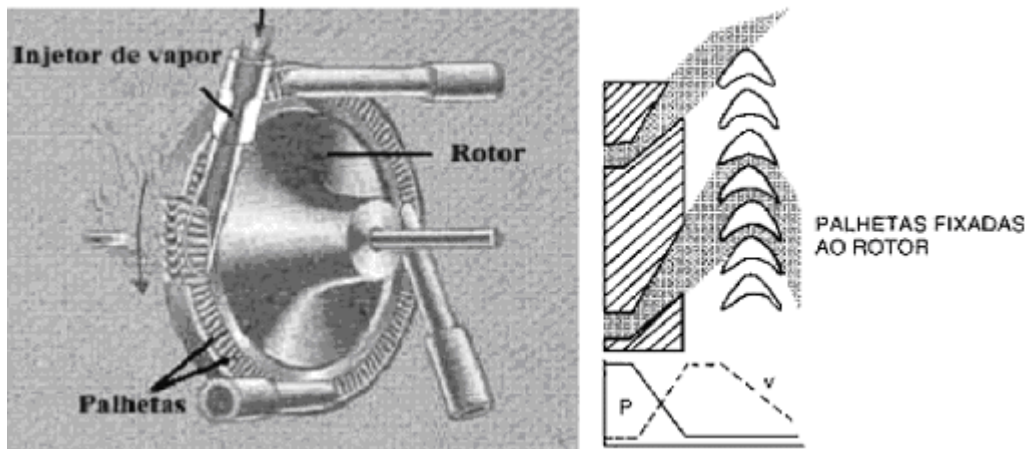


Figura 33: Princípio de funcionamento da turbina.

Segundo Martinelli (2000), os estágios de ação podem ser de dois tipos (Figura 34): estágios de pressão, também conhecidos como estágios Rateau, e estágio de velocidade, conhecidos como estágios Curtis.

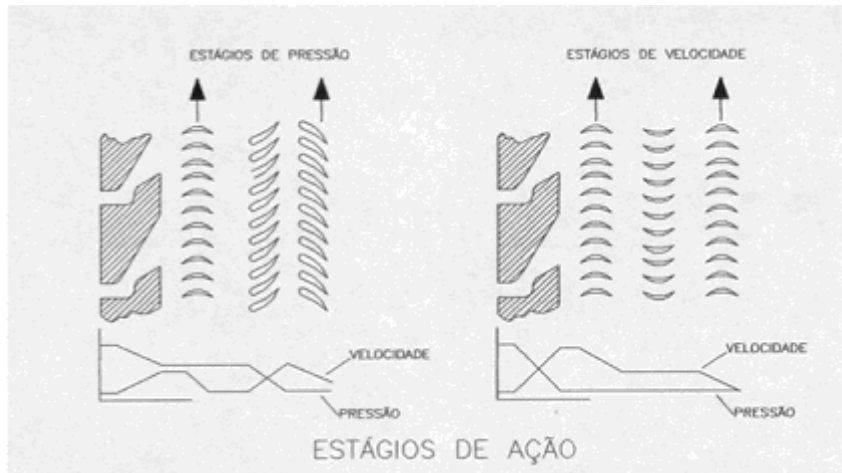


Figura 34: Tipos de estágios de ação de turbinas a vapor

. *Turbinas de Reação.*

Nas turbinas de reação (Figura 35), a pressão do vapor na entrada dos canais formados pelas palhetas é maior que a pressão à saída, de modo que o vapor realiza um trabalho de distensão durante sua ação sobre as palhetas. O modelo clássico é a de Parsons (Figura 36).

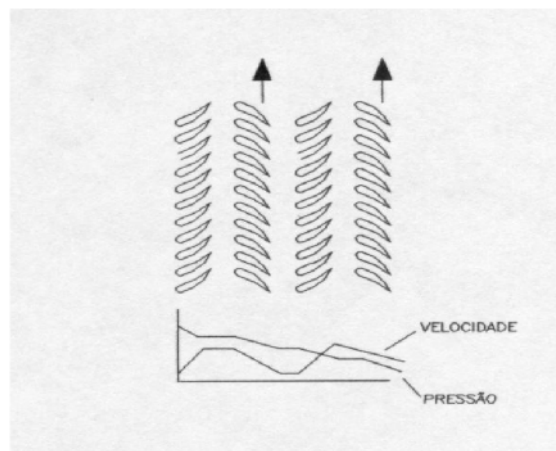


Figura 35: diagrama funcional – turbina a vapor de reação.



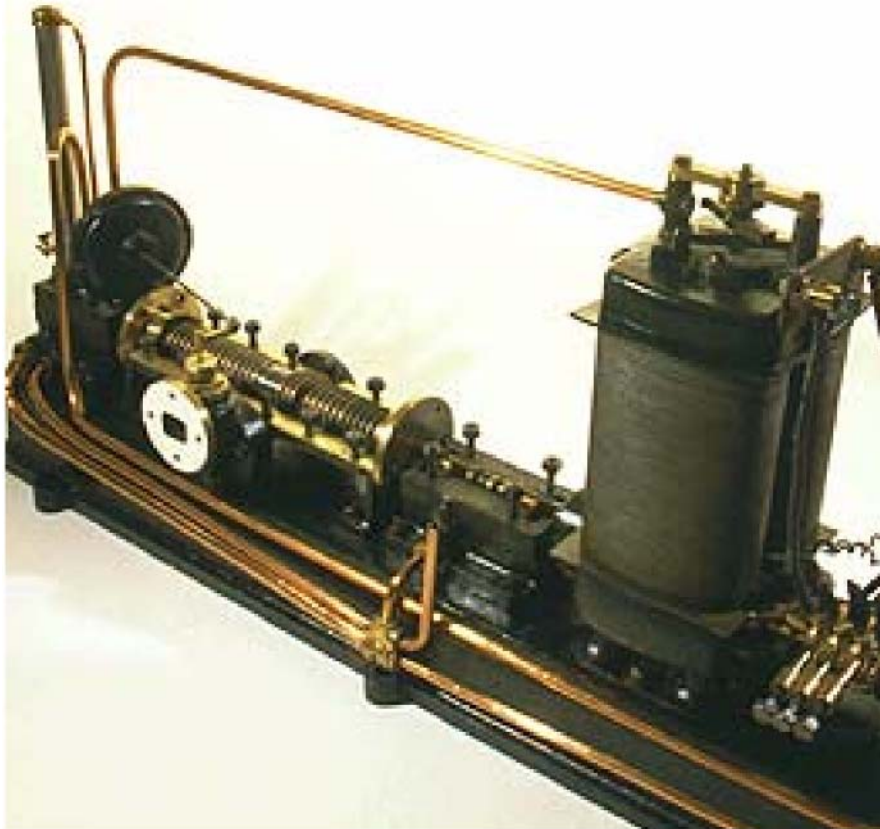


Figura 36: Turbina de Parsons

Conforme Martinelli (2000), como as turbinas de estágio único são sempre de ação, o uso de estágios de reação restringe-se aos estágios intermediários e finais das turbinas de reação de estágios múltiplos, pois mesmo nestas o primeiro estágio é usualmente um estágio de ação.

#### *. Turbinas Mistas*

São turbinas que apresentam vários rotores em um mesmo eixo (multi-estágios), e podem fazer uma combinação de estágio de ação e reação. Este tipo de turbina normalmente apresenta o primeiro estágio de reação e os demais de ação (Figura 37).



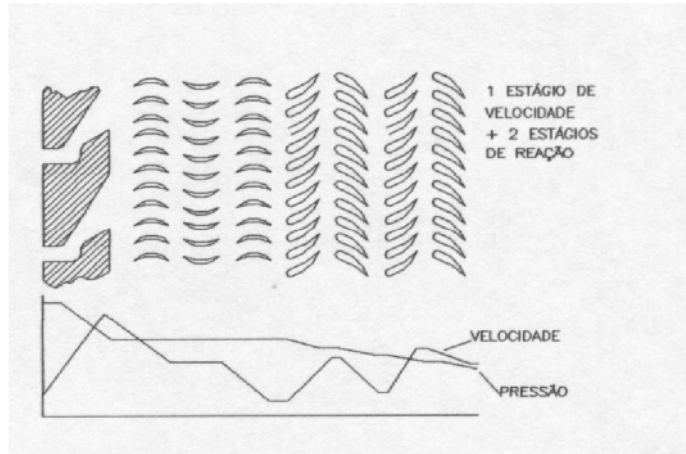


Figura 37: Esquema funcional de turbina a vapor multiestágio (ação e reação)

### . Classificação com referencia ao vapor de escape

#### . Turbinas a vapor de contra pressão

Neste tipo de turbina a pressão de escape é superior a pressão atmosférica. O vapor que sai da turbina é utilizado como fonte de calor para uso em um processo produtivo, caso típico das usinas de açúcar e álcool (Figura 38).

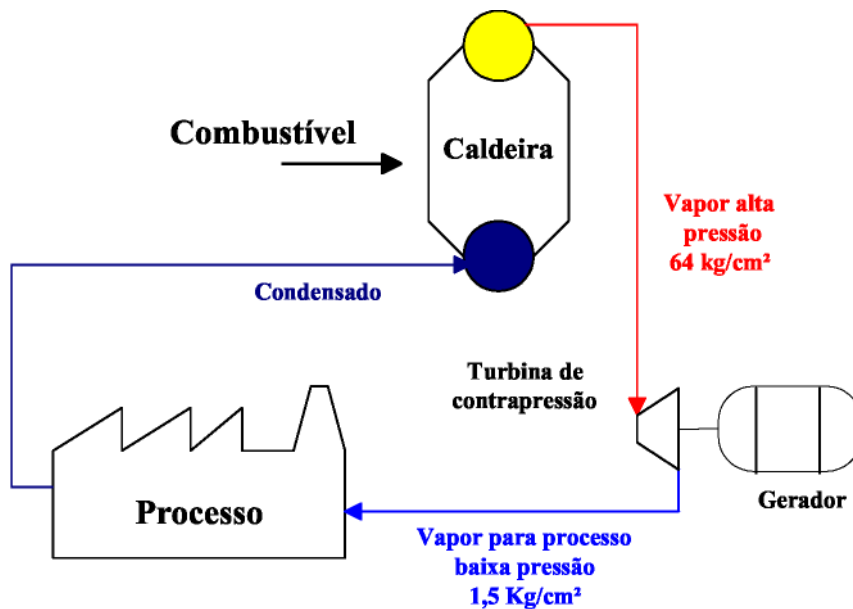


Figura 38- Aplicação de turbina de contra pressão

. *Turbinas a vapor de condensação.*

São turbinas que operam com pressões de escape abaixo da pressão atmosférica através do uso de um condensador de vapor, permitindo um maior aproveitamento da energia térmica contida no vapor.

Conforme ilustra a Figura 39 este tipo de turbina aplica-se, por exemplo, para geração de energia elétrica em indústrias que tenham disponibilidade de combustível, mas não necessitem de calor para o processo produtivo (madeireiras, beneficiamento do arroz, etc). Nas usinas de açúcar e álcool é aplicável quando há excedente de bagaço para geração de energia elétrica no período de entressafra, quando a produção esta parada.

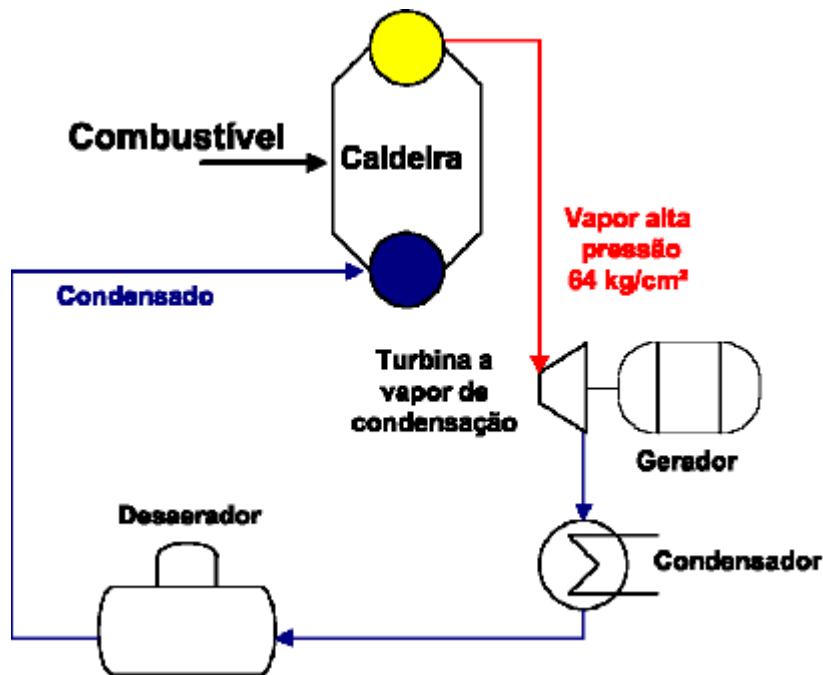


Figura 39: Aplicação de turbinas a vapor de condensação

*. Classificação quanto ao numero de estágios*

*. Turbinas a vapor mono-estágio.*

A turbina a vapor de simples estágio é uma máquina que já tem o seu uso difundido nos mais diversos setores de atividade para a transformação da energia térmica armazenada no vapor em trabalho. Este trabalho pode ser utilizado diretamente no acionamento de equipamentos relacionados ao processo produtivo ou para a geração de energia elétrica.

Esta máquina consiste essencialmente de um rotor apoiado em mancais e de uma carcaça cilíndrica externa. O rotor é impelido a girar por jatos de vapor que saem dos bocais localizados na periferia do cilindro externo e são dirigidos às palhetas fixadas no rotor.

Estas turbinas representam quase a totalidade das turbinas utilizadas em usinas de cana de açúcar e álcool, apresentam baixo rendimento (inferior a 50 %) constituindo um grande potencial de conservação de energia através da substituição das mesmas, por turbinas de multi-estágios de maior rendimento ou motores elétricos (Figura 40). Possuem rotor tipo Curtis ou Roteau.

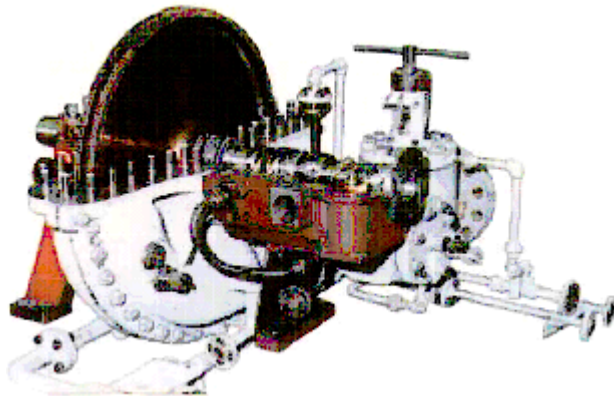


Figura 40: Turbina a vapor de simples estágio

*. Turbinas a vapor multi-estágios*

São turbinas de tecnologia mais elaborada, com maior rendimento, que podem chegar a 85 % e trabalham com altas pressões de vapor que podem ultrapassar 100 kg/cm<sup>2</sup>. Sua grande aplicação está destinada à geração de energia elétrica acoplada a geradores com potências de até 100 MW (Figura 41 e Figura 42).

O número de estágios pode variar de 4 à 40 sendo normalmente os dois primeiros de ação. Os estágios seguintes podem ser de ação ou de reação sendo na maioria dos casos de reação.

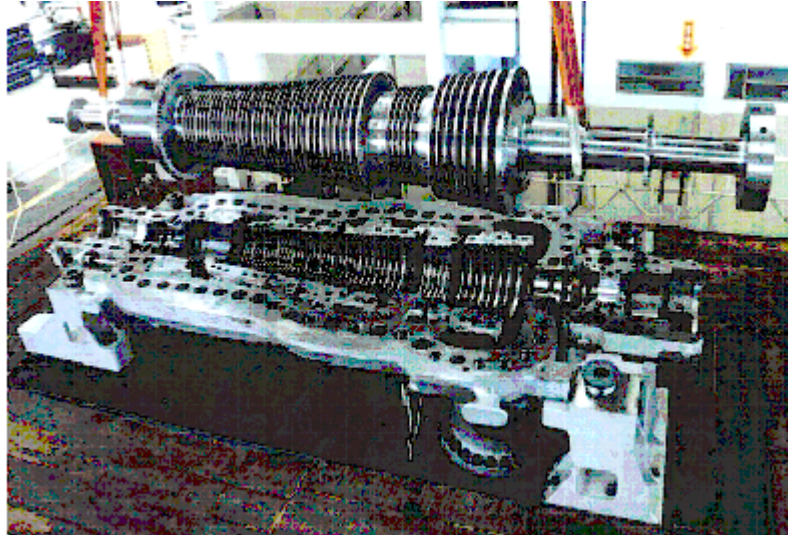


Figura 41: Turbina a vapor multi-estágio –vista do rotor



Figura 42: Turbina a vapor multi-estágio montada

As turbinas a vapor multi-estágios podem possuir em aplicações especiais, *extração* de vapor a uma pressão intermediária entre a pressão de entrada e saída da turbina. São utilizadas em instalações onde sejam necessários dois ou mais níveis de pressão de vapor. A extração pode ocorrer em turbinas a vapor de contrapressão ou condensação.

As extrações podem ser automáticas (controladas) ou não automáticas (não controladas, também chama de sangria).

Turbinas a vapor com extração automática: Há em um, dois ou três estágios intermediários, uma retirada parcial de vapor, para fins de aquecimento ou uso no processo industrial. A pressão do vapor extraído é mantida constante por meio das válvulas de controle de extração. O sistema de controle de uma turbina com extração automática atua simultaneamente sobre as válvulas de controle de admissão e sobre as válvulas de controle de extração, para manter constantes a velocidade da turbina e a pressão do vapor extraído, quaisquer que sejam as flutuações da carga e da demanda de vapor extraído, desde é claro que não seja excedida a capacidade máxima da máquina.

Turbinas a vapor com extração não-automática: Pode haver até nove pontos de retirada de vapor, em diferentes estágios e pressões. A pressão do vapor extraído, em cada ponto de extração, de uma turbina com extrações não-automáticas, varia com as flutuações da carga da turbina. Estas variações de pressão, embora inadmissíveis se o vapor estiver sendo extraído para uso em um processo industrial, podem perfeitamente ser aceitas se o vapor extraído for usado apenas para aquecimento regenerativo como por exemplo, da água de alimentação de caldeira.

As turbinas multi-estágios são indicadas para aplicações especiais podendo ter vários tipos de configuração de acordo com sua aplicação e necessidades do processo produtivo. Além das de contrapressão e condensação podemos ter as seguintes combinações:

*.Turbinas a vapor de contrapressão com extração controlada.*

São turbinas que permitem a alimentação de uma segunda rede de consumidores com vapor a uma pressão superior à de contrapressão da turbina. São utilizadas quando a demanda de vapor de média pressão (extração) é relativamente alta e possuem variações consideráveis de vazão.

Neste tipo de turbina tanto a pressão do vapor de extração como o de contrapressão permanecem constantes para variações de vazão seja da extração ou do escape.

Em usinas de açúcar e álcool este tipo de turbina aplica-se em situações onde a pressão da caldeira é elevada para acionar turbinas de geradores e as turbinas existentes de outros acionamentos operam em pressões menores (Figura 43).

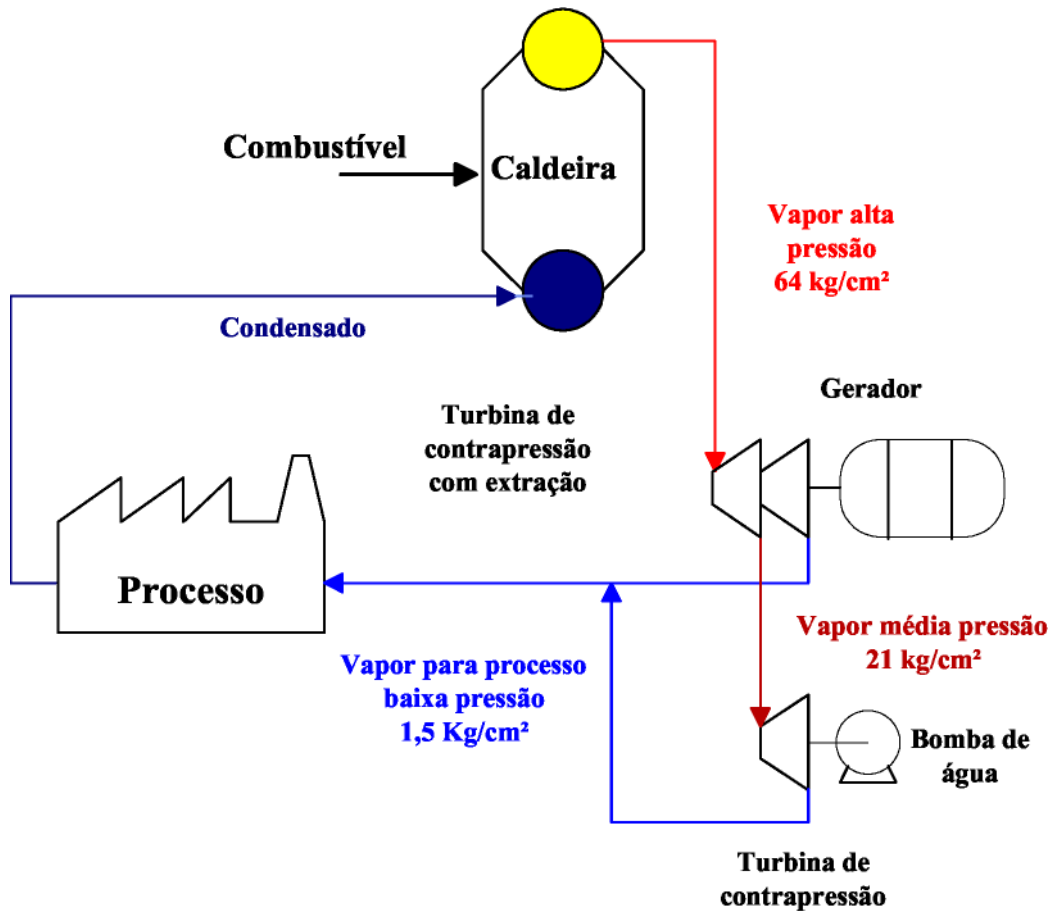


Figura 43- Aplicação de turbina a vapor de contrapressão com extração controlada

*.Turbinas a vapor de contrapressão com extração não controlada:*

São turbinas adequadas nos casos em que duas redes de vapor devem ser alimentadas com pressões diferentes, e a vazão da extração é menor que a de escape. Neste tipo de turbina a pressão da extração varia em função da carga da turbina.

*Turbinas a vapor de condensação com extração controlada:*

Para casos onde há excesso de combustível este tipo de turbina permite gerar energia elétrica independente das variações de vazão do processo produtivo. Este tipo de turbina possui uma flexibilidade que permite produzir exclusivamente energia elétrica caso não haja consumo de vapor na extração, ou maior consumo de vapor (extração) e menor geração de energia elétrica.

Sua aplicação nas usinas de açúcar e álcool destina-se a situações onde o excedente de combustível (bagaço e palha), permita geração de energia elétrica durante o período de entressafra, quando a produção permanece parada. A Figura 44 ilustra uma aplicação de turbina de condensação com extração.



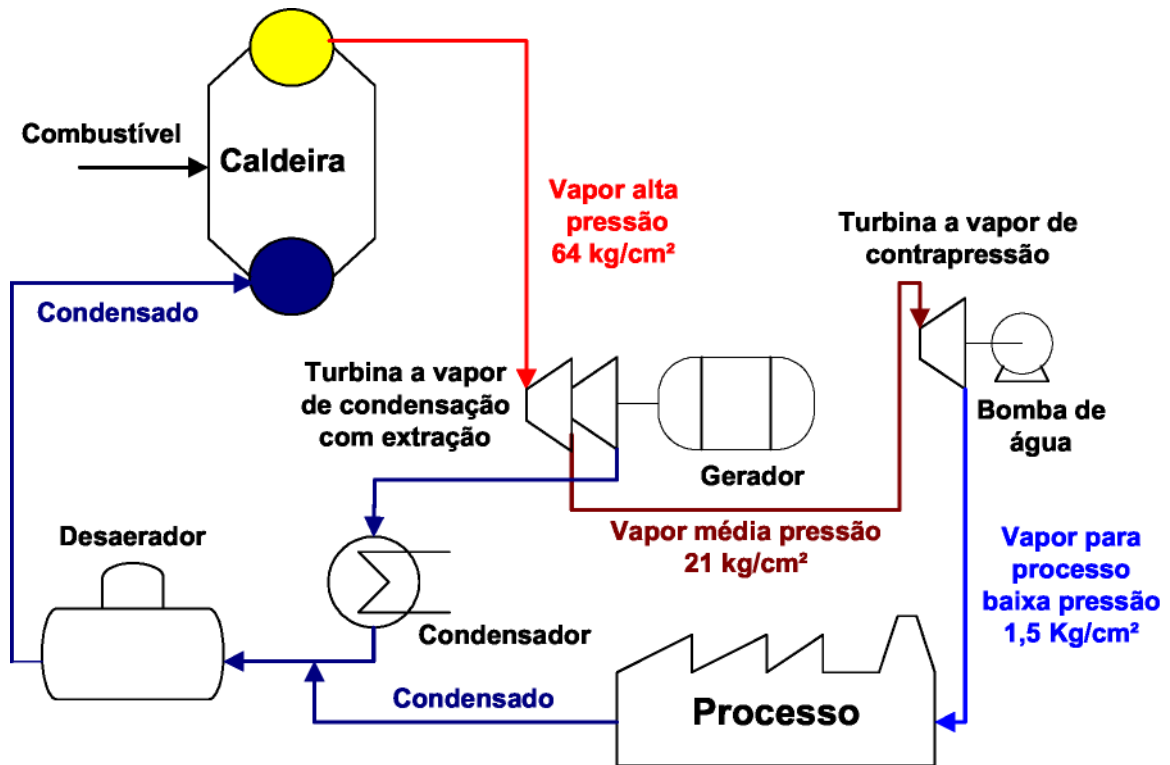


Figura 44 - Aplicação de turbina a vapor de condensação com extração controlada

### 6.5.3. Geradores e Motores.

.Geradores:

A geração de energia elétrica nas usinas de açúcar e álcool, para atender suas necessidades internas de consumo, vem ocorrendo a várias décadas. É realizada através de turbinas a vapor que acionam os geradores. O conjunto formado pela turbina a vapor e o gerador é normalmente denominado turbogerador. Os primeiros geradores (Figura 45) geravam em baixa tensão (220 à 440 V) e potências variando de 300 à 2000 kW (Hugot, 1969).



Figura 45: Geradores 1500kVA, 380V.

Com a evolução dos geradores e crescimento das usinas, necessitando de equipamentos de maior porte, a tensão de geração evoluiu para 13.800 V. Até as mudanças na legislação do setor de energia elétrica, permitindo comercialização de excedentes de energia elétrica através da cogeração, a potências na grande maioria dos casos era de 2000 à 10.000 kW. Atualmente os novos projetos de cogeração visando disponibilizar excedente de energia tem solicitado equipamentos acima de 20.000 kW (Figura 46). No mercado brasileiro para este tipo de aplicação são fabricados equipamentos de até 60.000 MVA.



Figura 46: Geradores 31.250kVA, 13800V.

#### *Motores Elétricos:*

As usinas de açúcar e álcool, na grande maioria, acionam moendas, exaustores e bombas de água, através de turbinas a vapor. São turbinas de simples estágio e de baixo rendimento. A substituição destas turbinas por motores elétricos, consiste em um grande potencial de conservação de energia em função do maior rendimento dos motores elétricos e disponibilizar o vapor antes utilizado nestas turbinas, para geração de energia elétrica através de turbinas a vapor de multi-estágios, que possuem maior rendimento.

Os motores para este tipo de aplicação, na grande maioria dos casos (principalmente nas moendas), envolvem potências acima de 1000 CV, podendo chegar a 3000 CV, por exemplo, para acionamento de desfibradores de cana. Estes motores são projetados para serem acionados em média tensão que podem variar de 2300 à 6600 V e potências de até 3150 kW (4280 CV). Em aplicações especiais podem ser fabricados para operar em 13800 V



e potências de até 22000 kW (29890 CV). Os motores industriais comerciais em baixa tensão (por exemplo, 440 V) são fabricados até 800 CV. As Figuras 47 e 48 apresentam características gerais de motores elétricos especiais disponíveis no mercado nacional.

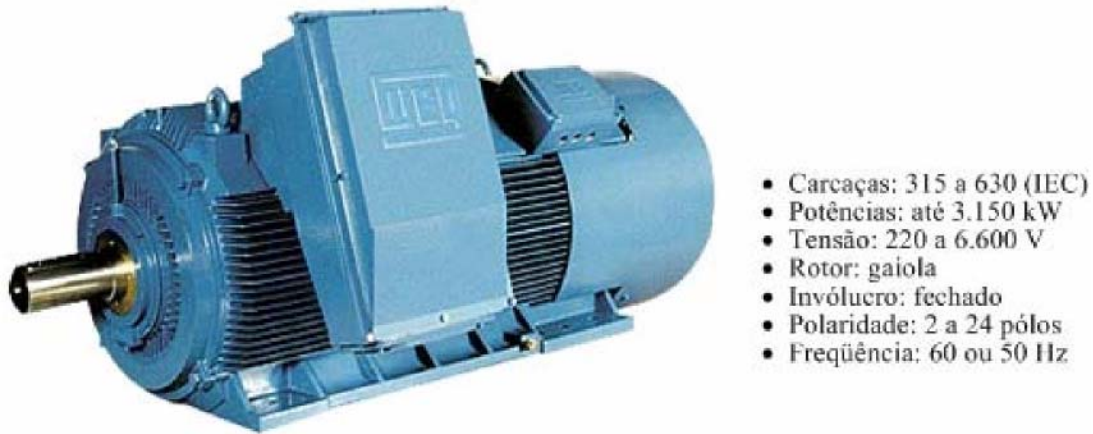


Figura 47 – Motores até 3150 kW e tensão de 6600 V

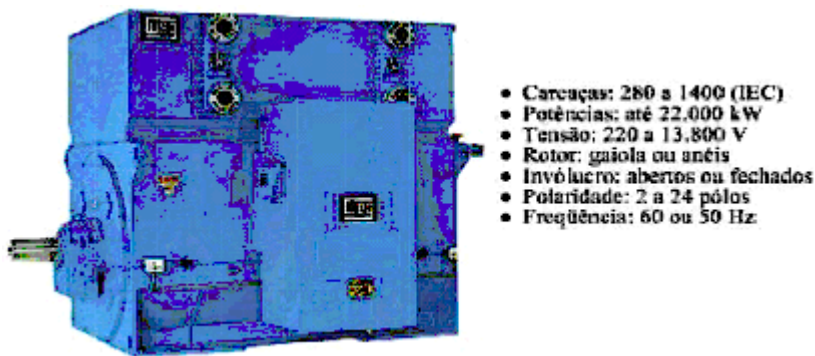


Figura 48: Motores até 2200 kW e tensão de 13800

## **7. Conclusões.**

A busca de excedentes de energia elétrica através de melhorias nos acionamentos, com o sistema de cogeração em usinas de açúcar e álcool, está centralizado na modernização de suas instalações e otimizações no processo produtivo, portanto, é imperativo a implementação de equipamentos energeticamente mais eficientes.

Na maioria das usinas brasileiras, as caldeiras ainda operam à pressão de 21 kg/cm<sup>2</sup> e as turbinas a vapor são de simples estágio. A substituição das caldeira, elevando-se a pressão de operação e aplicação de turbinas a vapor de multi-estágios, são alternativas que permitem grandes excedente de energia elétrica.

A substituição de turbinas a vapor por motores elétricos vem ganhando destaque em função do potencial de conservação de energia, por apresentar maior rendimento e disponibilizar maior quantidade de vapor para geração de energia elétrica. Pelas altas potências envolvidas, principalmente nas moendas (1000 á 3000 CV), os motores para esta aplicações são acionados em média tensão (2300 à 6600) e em aplicações especiais em alta tensão (13800 V).

Nas instalações a unidade produtora de açúcar e álcool localizada em Bocaina, já estão instaladas turbinas de multi-estágio no setor de moagem de cana, na geração de vapor existe duas caldeiras operando em 21Kgf/cm<sup>2</sup>, e uma caldeira operando em 42Kgf/cm<sup>2</sup>, onde está opera para geração de energia elétrica, onde estão localizados dois geradores um de 15000 KW com turbina de contrapressão e um de 12000 KW com turbina de condensação, gerando em tensão de 13800 V.

As turbinas que ainda estão operando em condição insatisfatória são as turbinas que acionam os exaustores das caldeiras, que ainda são do tipo simples estagio ou mono estagio, a substituição destas por motores elétricos deixaria a operação do sistema de geração de vapor e energia elétrica com excedente de energia elétrica para comercialização.

## 8. Referências Bibliográficas

ANEEL(AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELETRICA

www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/12-Ref\_bibliograficas.pdf -

Artigo técnico da revista álcool Brás setembro / outubro de 2003 p.91.

BABCOCK & WILCOX. *Steam its generation and use*. 39ª ed. New York: The Babcock & Wilcox Company, 1978. p. 1-5.

BALESTIERI, José Antonio Perrela. *Cogeração:Geração Combinada de Eletricidade e Calor*. Florianópolis: UFSC, 2002. p. 17-32.

BROEK, R.. Electricity generation from eucalyptus and bagasse by sugar mills in Nicarágua, *Biomass and Bioenergy* 19, p. 311-335, 2000.

CAMPANARI. Curso de Caldeiras a Vapor, Ribeirão Preto, Agosto/2002

CARPIO, R. C. et al, Critérios de Avaliação Termodinâmica para Sistemas de Cogeração em Usinas de Açúcar e Alcool. Cobem99 - Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 1999.

MME Ministério das Minas e Energia, Proinfra - disponível no site <[www.inee.org.br/downloads/forum/Parecer%20INEE%20Proinfra.pdf](http://www.inee.org.br/downloads/forum/Parecer%20INEE%20Proinfra.pdf)> Acesso em 08/12/2003.

COOPERATIVA DE PRODUTORES DE CANA, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO LTDA. **COPERSUCAR: III seminário de tecnologia industrial: centro tecnológico copersucar. Piracicaba: 1987. 748p.**

CLEMENTINO, Luiz Donizete. A Conservação de Energia por meio da CoGeração de Energia Elétrica. 1ª ed. São Paulo: Érica, 2001. p. 33-40.

Domingues, M; Heubel, M.T.C.D; Abel, I.J. **Bases metodológicas para o trabalho científico: para alunos iniciantes. Bauru: EDUSC, 2003. 185p.**

FINNERTY, John D.. *Project Finance: engenharia financeira baseada em ativos*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

FLANDRIN,J.L. , Montanari, M. (org) *História da Alimentação*. São Paulo : Ed. Estação Liberdade 1998. 885 paginas.

HUGOT, E.*Le Sucrierie de Cannes*. Paris: Dunod, 1970.

Manual de orientação para o projeto de iniciação científica (**PIBIC/CNPq e FAP/USC**).

MACINTYRE, A. J.. *Equipamentos Industriais e de Processo*. Rio de Janeiro: LT – Livros Técnicos e Científicos Ed

MARAFANTE, Luciano, J..*Tecnologia de fabricação do álcool e do açúcar*. São Paulo: Ícone editora, 1993.

- MARQUES, M.O. , MARQUES, T.A. , TASSO, L.C. Tecnologia do Açúcar: Produção Industrializada da Cana de Açúcar, Jaboticabal, Funep, 2001. 169 paginas
- MATARUNA, A. C. G., Vapor D'Água Geração, Aplicação e cuidados no seu uso – disponível no site [www.geocities.com/acgmataruna/](http://www.geocities.com/acgmataruna/) Acesso em 14/10/2003.
- MATSUMOTO, E.Y.. *Simulink 5*. 2ª ed. São Paulo: Érica, 2003.
- MEADE, George P.; CHEN, James C.P.. *Cane Sugar Handbook*. New York: John Wiley & Sons, 1977.
- NÖEL, E. L. R., Conegeration and the Optimal Steam/energy balance, Int. Sugar JNL, Vol. 96, n. 1146, p. 205-209, 1994.
- PAYNE, John H. , *Operações Unitárias na Produção de Açúcar de Cana*, São Paulo: STAB, 1989.
- PERA, H.. *Geradores de Vapor*. São Paulo: Fama, 1990. cap. 13-15.
- PERES, N. P.. *Eficiência em Caldeira na Agroindústria Canavieira*. Piracicaba: STAB Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil, 1982. 73 p..
- PETERS, Max S.; TIMMERHAUS, Klaus D.. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. New York: McGrawHill, 1991.
- RASOVSKY, E. Milan. *Álcool: destilarias*. Rio de Janeiro: Instituto do Açúcar e do Álcool, 1979.
- Revista Alcoolbrás INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. *Conservação de energia na industria do açúcar e do álcool: manual de recomendações*. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1990.
- SILVA FILHO, B.S. Curso de Introdução ao SIMULINK. Disponível no site <http://152.92.155.55/download.htm> acesso em 03/06/2002.
- SOUZA, J. R. A, O que as indústrias querem saber sobre co-geração. *Eletricidade Moderna*, v.163, p.30. ago.1987.
- SOUZA, Z. J.; BURNQUIST, H. L.. A Comercialização da Energia Elétrica Cogenerada pelo Setor Sucroalcooleiro. São Paulo: Plêiade Ltda, 2000. p. 35-39.
- TORREIRA, R. P.. *Geradores de Vapor*. São Paulo: Libris, 1995. cap. V, IX WEG
- União da industria de cana de açúcar, história da cana de açúcar disponível no site [www.portaunica.com.br/portaunica/index.php?Secao=memória&SubSecao=cana-de-açúcar&SubSubSecao=historia&id=%20and%20id=](http://www.portaunica.com.br/portaunica/index.php?Secao=memória&SubSecao=cana-de-açúcar&SubSubSecao=historia&id=%20and%20id=)
- UNICA, União da Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo, Potencial de cogeração

Brasileiro – disponível no site [www.unica.com.br](http://www.unica.com.br) > Acesso em 23/04/2004.