



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**PLACIDO GOUVEIA DE ARAUJO BORBA FILHO**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE TURBINA A VAPOR E MOTOR  
ELÉTRICO APLICADO A USINA SUCROALCOLEIRA**

**JOÃO PESSOA – PB**

**2018**

**PLACIDO GOUVEIA DE ARAUJO BORBA FILHO**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE TURBINA A VAPOR E MOTOR  
ELÉTRICO APLICADO A USINA SUCROALCOLEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba como parte das exigências à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Jean Pierre Veronese

**JOÃO PESSOA – PB**

**2018**



**AVALIAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC**

NOME PLÁCIDO GONÇEVA DE ARAÚJO BOMFIM Matrícula 17117478

TÍTULO: ESTUDO COMPARATIVO ENTRE TURBINA A VAPOR E MOTOR ELÉTRICO APLICADO A USINA SUCROALCOOLICA

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

**AVALIAÇÃO**

Prof. [Assinatura] Orientador / [Assinatura] Rubrica / 10,0 Nota

Prof. JACQUES CESAR DOS SANTOS Membro / [Assinatura] Rubrica / 10,0 Nota

Prof. [Assinatura] Membro / [Assinatura] Rubrica / 10,0 Nota

Média Final: 10,0

Situação: (X) aprovado / ( ) reprovado

**RECOMENDAÇÕES:**

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

João Pessoa, 08 de NOVEMBRO de 2018.

**OBS: A REFERIDA MÉDIA SÓ SERÁ IMPLANTADA APÓS AS CORREÇÕES EXIGIDAS PELO ORIENTADOR.**

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

L732a Lima, Ramon Leal de.

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES MÉTODOS DE  
EXTRAÇÃO SOBRE AS ATIVIDADES ANTIOXIDANTE,  
FOTOPROTETORA E O TEOR DE FENOIS TOTAIS DE *Zornia*  
*brasiliensis* Vogel. / Ramon Leal de Lima. - João  
Pessoa, 2018.

101 f. : il.

Orientação: Josean Fechine Tavares Tavares.

Coorientação: Yuri Mangueira do Nascimento Nascimento.  
Monografia (Graduação) - UFPB/CCS.

1. *Zornia brasiliensis*. 2. Extração. 3. Atividade  
antioxidante. 4. fotoproteção. I. Tavares, Josean  
Fechine Tavares. II. Título.

UFPB/BC

O que poderia ter sido e o que foi  
Apontam para um único fim, sempre presente  
Passos ecoam na memória  
Pelo caminho não escolhido  
Rumo à porta que nunca abrimos.

T. S. Eliot, "Burnt Norton"

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a meus pais, tudo que sou e tudo que virei a ser, é contruído sobre a base sólida de amor, apoio e orientação que eles me proporcionaram. Obrigado pai e mãe, vocês sempre serão meus maiores exemplos e guias e os seguirei até o fim de minha vida.

Agradeço a todos os meus amigos e colegas de curso, David, Marcos Mickael, e tantos outros que, por conhecerem o apoio e copereção existente ao longo de toda duração do curso, posso dispensar maiores explicações e apenas expressar minha gratidão. Entre todos, cito dois que estiveram sempre ao meu lado, compartilhando alegrias e tristezas, comemorando as conquistas e lamentando as derrotas, obrigado Romero e Yanko, por não ter paavras que definam minha gratidão, apenas chamo ambo de irmãos.

Agradeço aos meus professores, se hoje vejo mais longe, é porque estou apoiado em seus ombros.

“...Simplesmente morreu de uma fria apatia e de tédio, com um sofrimento, por assim dizer, animal e inconsciente, era simplesmente sufocante viver assim, como se faltasse ar. Sua alma inconscientemente não suportou a linearidade, e inconscientemente exigiu algo mais complexo...”

Fiódor Dostoiévski, “Dois Suicídios”.

## RESUMO

A turbina a vapor sempre foi o principal meio de acionamento dos equipamentos de prepare e moagem da cana de açúcar nas usinas de sucroalcooleiras. Com o avanço tecnológico, tanto das turbinas como dos motores elétricos, o comparativo entre as vantagens desses dois tipos de acionamento é inevitável. As diferenças são inúmeras: Rendimento energético, rendimento térmico total, desempenho e vantagens e desvantagens técnicas. Além disso, as usinas estão investindo na cogeração de energia, ou seja, além do uso da energia gerada no processo, vender energia elétrica para a concessionária local, coisa que nem sempre é possível devido à quantidade modificações e investimento necessários. A substituição de turbinas nos acionamentos é uma tendência para usinas que apenas visam melhorar sua eficiência térmica e é praticamente obrigatório para as que pretendem cogерir energia. Nesse contexto, esse trabalho tem o intuito de realizar um estudo comparativo entre turbina a vapor e motor elétrico aplicado à usina sucroalcooleira.

## **ABSTRACT**

The steam turbine has always been the main way to prepare equipment and drive grinding sugar cane in sucroalcooleiras plants. With the technological advancement, both of the turbines and electric motors, the comparison between the advantages of these two kinds of firing is inevitable. The differences are numerous: energy efficiency, total thermal performance, performance and technical advantages and disadvantages. In addition, the plants are investing in cogeneration of energy, that is, in addition to using the energy generated in the process, selling electricity to the local dealership, which is not always possible due to the amount and modifications nécessaires investment. Turinas replacement drives us is a tendency for plants that only aim to improve thermal efficiency and your is almost mandatory for those wishing to cogerir energy. In this context, this work is intended to carry out a comparative study between steam turbine and electric motor applied to the sucroalcooleira power plant.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo de produção de álcool. ....	19
Figura 2 – Diagrama de um sistema de cogeração com turbina a vapor.....	21
Figura 3 – Vista esquemática de um gerador simples, síncrono, monofásico e de quatro pólos. .....	24
Figura 4 – Balanço térmico. ....	28
Figura 5 – Balanço térmico visando economia de vapor.....	29
Figura 6 – Balanço térmico visando cogeração.....	31

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

UNICA - União da Indústria de Cana de Açúcar

PIB – Produto Interno Bruto

pH – Potencial Hidrogeniônico

CC – Corrente Contínua

CA – Corrente Alternada

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	13
1.1 OBJETIVO GERAL.....	14
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	15
2.1 SETOR SUCROALCOOLEIRO .....	15
2.2 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE AÇÚCAR .....	18
2.3 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ÁLCOOL.....	18
2.4 COGERAÇÃO DE ENERGIA NO SETOR SUCROALCOOLEIRO .....	20
2.5 EFICIÊNCIAS TÉRMICAS PELA PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA.....	22
2.6 MOTORES DE INDUÇÃO .....	22
2.7 GERADORES ELÉTRICOS .....	23
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	25
3.1 VANTAGENS E DESVANTAGENS TÉCNICAS.....	25
3.2 ECONOMIA DE VAPOR .....	25
3.3 ECONOMIA DE BAGAÇO .....	25
3.4 POTENCIAL DE COGERAÇÃO:.....	25
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	26
4.1 VANTAGENS E DESVANTAGENS TÉCNICAS.....	26
4.2 ECONOMIA DE VAPOR .....	28
4.3 ECONOMIA DE BAGAÇO .....	30
4.4 POTENCIAL DE COGERAÇÃO.....	30
<b>CONCLUSÃO</b> .....	32
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	33

## 1 INTRODUÇÃO

O setor sucroalcooleiro tem como principais produtos o açúcar, o etanol e, recentemente, a energia elétrica. Este é um setor bastante tradicional na economia brasileira, remontando ainda ao período colonial e mantendo-se como um dos principais do país em termos de participação no produto interno bruto (PIB), geração de emprego e inserção internacional.

Atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, sendo que aproximadamente 2% de suas terras aradas são utilizadas para esta cultura.

O Brasil possui mais de 450 usinas sucroalcooleiras, em que todas podem ser consideradas autossuficientes em energia devido a produção de vapor por meio da queima de biomassa proveniente da cana de açúcar em caldeiras. Todavia, somente 20% destas usinas comercializam seus excedentes de energia elétrica no mercado brasileiro.

Considerando a grande viabilidade da utilização do bagaço proveniente da cana de açúcar para geração de uma quantidade significativa de energia elétrica, grandes esforços em pesquisa de desenvolvimento devem ser direcionados a este setor, almejando o aumento de eficiência nos processos envolvidos, resultando assim em um maior aproveitamento energético da biomassa disponível.

Para tornar didática a apresentação desse texto, acrescenta-se a essa introdução as seguintes seções:

Na seção dois são apresentados tópicos relacionados ao setor sucroalcooleiro, processo de produção de açúcar e álcool, cogeração de energia no setor sucroalcooleiro, eficiências térmicas pela primeira lei da termodinâmica, bem como motores elétricos.

Na seção três são apresentados os procedimentos metodológicos, bem como as análises necessárias para alcançar o objetivo proposto.

Na seção quatro são apresentados os resultados e discussão desse trabalho.

Na seção cinco são apresentadas conclusões geradas pelas análises e possíveis sugestões a serem abordadas no futuro em outros trabalhos.

Por fim, é apresentada uma lista de referências bibliográficas usadas para a execução deste trabalho, na qual constam livros clássicos, artigos de periódicos e de congressos, teses e dissertações, além de websites de empresas e instituições.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do presente trabalho é realizar um estudo comparativo entre turbina a vapor e motor elétrico aplicado a usina sucroalcooleira.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Mostrar as vantagens e desvantagens técnicas de uma usina sucroalcooleira em dois casos distintos, no primeiro caso usando turbina a vapor, no segundo caso motor elétrico;
- b) Analisar os dados e resultados obtidos para determinar a economia de vapor;
- c) Analisar os dados e resultados obtidos para determinar a economia de bagaço;
- d) Determinar o potencial de cogeração em ambos os casos.
- e) Averiguar o custo de aquisição e implementação de uma turbina a vapor ou motor elétrico.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nessa seção serão abordados tópicos relacionados ao setor sucroalcooleiro, processo de produção de açúcar e álcool, cogeração de energia no setor sucroalcooleiro, eficiências térmicas pela primeira lei da termodinâmica, bem como motores elétricos.

### 2.1 SETOR SUCROALCOOLEIRO

O setor sucroalcooleiro está organizado basicamente em três estágios: plantação e cultivo da cana-de-açúcar; produção do açúcar ou álcool; comercialização do produto final. Algumas empresas atuam em todos os estágios, mantendo o seu foco na produção do açúcar ou do álcool (LIBONI, 2009).

Segundo Unica (2010), a cana ocupa 7,8 milhões de hectares ou cerca de 2% de toda a terra arável do País. O Brasil é, atualmente, o maior produtor do mundo, seguido pela Índia e China, e possui uma grande vantagem em relação aos países concorrentes, visto que pelo tamanho do território brasileiro, é possível que se obtenha dois períodos de safra durante o ano, produção esta concentrada principalmente na região Centro-Sul e Norte-Nordeste. Dessa forma, durante todo o ano o Brasil produz açúcar e etanol, para os mercados interno e externo.

Apenas o Sudeste, em 2006, foi responsável por 64% da área com cana-de-açúcar no Brasil; na safra 2007/2008 o Centro-Sul foi responsável por 87% da produção de cana-de-açúcar no país (UNICA, 2008).

No Brasil, aproximadamente 55% da cana-de-açúcar produzida se transforma em álcool e 45% em açúcar, apesar de que a cana está presente em aproximadamente 307 centrais energéticas existentes no Brasil (PEIXOTO, 2010).

O Estado de São Paulo possui quase 50% das unidades produtivas processando mais de 60% da cana. Os outros destaques são os estados do Paraná e de Minas Gerais, que processam em torno de 7% da cana. O Nordeste é responsável por 12,5%. A principal área de expansão da cultura canavieira é o Centro-Oeste e determinadas regiões do Sudeste, com destaque para Minas Gerais (TONETO JR.; LIBONI, 2007).

Através das usinas e destilarias que processam a biomassa proveniente da cana-de-açúcar, esta cultura participa de um ciclo produtivo, gerando açúcar como alimento, energia elétrica proveniente da queima do bagaço da cana, álcool hidratado utilizado principalmente para movimentar veículos e álcool anidro utilizado principalmente para aperfeiçoar o desempenho energético e ambiental da gasolina. Para exemplificar sua capacidade e

versatilidade, cada tonelada de cana-de-açúcar gera um potencial energético equivalente ao potencial de 1,2 barril de petróleo (UNICA, 2010).

As usinas brasileiras apresentam elevada eficiência produtiva na extração, fermentação e destilação. Além de vantagens naturais associadas à qualidade do solo e do clima, parcela significativa do sucesso do país decorre dos ganhos de produtividade ocorridos nos últimos anos em todas as etapas do processo produtivo (LIBONI, 2009).

A primeira etapa da destinação produtiva da cana é a colheita, a mesma é realizada em sua maior parte, cerca de 80%, manualmente. O corte da planta é precedido da queima da palha da cana, o que torna o trabalho da colheita mais seguro e rentável para o trabalhador. A mecanização vem crescendo nesta etapa da produção de forma gradativa, envolvendo o desenvolvimento de políticas de reaproveitamento de mão-de-obra e monitoramento dos impactos ambientais, relacionados com a erosão e a difusão de pragas que acompanham a mecanização (PEIXOTO, 2010).

De acordo com Peixoto (2010), após o corte, a cana-de-açúcar é transportada para as usinas, no Brasil predominantemente com transporte rodoviário, com o emprego de caminhões que carregam a cana inteira (colheita manual) ou picada em toletes (colheita mecânica). O estoque da cana deve ser renovado em curtos espaços de tempo, visando à redução de perdas de açúcar por decomposição bacteriológica.

Já na usina, a cana-de-açúcar começa a receber tratamento através de máquinas e processos de produção. O primeiro equipamento pelo qual o produto passa usinas é a mesa alinhadora, que recebe as cargas do estoque e as transfere através de esteiras para as moendas, passando pelo sistema de preparo. Após este processo, a cana ainda passa por pelo desfibrilador, espalhador e calha de alimentação forçada. Estes procedimentos têm por objetivo reduzir a espessura da camada de cana para remoção de materiais ferrosos, protegendo os equipamentos de extração, como a moenda (COPERSUCAR, 2010).

A moagem consiste em extrair o caldo contido na cana, sendo assim um processo volumétrico. Essa extração é realizada fazendo a cana-de-açúcar passar entre dois rolos, submetidos à determinada pressão e rotação, gerando um volume menor que o da cana. Este procedimento também objetiva, embora secundariamente, a importante produção de um bagaço final, com condições de propiciar uma queima rápida nas caldeiras. Ainda neste processo, é utilizada a técnica da embebição, que consiste em adição de água ao bagaço, com a finalidade de diluir o caldo remanescente no bagaço, aumentando a extração de sacarose, passando a cana sucessivamente na moenda para extração (PEIXOTO, 2010).

Segundo Copersucar (2010), a difusão é um processo pouco utilizado no Brasil, e sua diferença com o processo anterior está no modo de separação do caldo da fibra. A tecnologia deste processo consiste em realizar esta separação em duas etapas: a difusão, que separa por osmose o caldo da fibra e a lixiviação, que é o arraste sucessivo pela água da sacarose e das impurezas contidas nas células. Após esta etapa, a remoção de água do bagaço ocorre através de rolos, como na moagem.

Em seu estudo, Peixoto (2010) informa que após este tratamento primário, obtém-se um material muito importante, principalmente para o funcionamento da própria usina: o bagaço da cana. Ele alimentará as caldeiras, onde é queimado, e a energia liberada transforma água em vapor. Nas caldeiras, o vapor gerado atinge uma pressão média de 18-21kgf/cm<sup>2</sup>, que é responsável pelo acionamento das turbinas a vapor, onde ocorre a transformação da energia térmica em energia mecânica. É a partir da energia gerada nestas turbinas que são acionadas as máquinas necessárias para todos os procedimentos citados acima. Esta energia também é utilizada para acionamento de geradores responsáveis pela produção de energia elétrica necessária para vários setores desta indústria. Além disso, como o vapor liberado pelas turbinas é considerado de baixa pressão (vapor de escape), ainda é reaproveitado como energia básica necessária no processo de fabricação de açúcar e de álcool.

De acordo com Peixoto (2010), após a extração do caldo da cana-de-açúcar, ele ainda apresenta uma grande variedade de impurezas. Portanto, o caldo passa por várias etapas de tratamento, objetivando a máxima eliminação das impurezas, o que garante qualidade aos produtos finais obtidos a partir da cana. Após o tratamento primário do caldo, ele ainda passa pelos seguintes processos:

- pesagem do caldo;
- tratamento químico;
- sulfitação;
- calagem;
- aquecimento;
- sedimentação;
- filtração;
- evaporação.

Após a colheita e os tratamentos descritos acima realizados no caldo da cana-de-açúcar através das usinas, ele está pronto para, a partir daí, transformar-se no subproduto desejado, em geral em açúcar ou álcool.

## 2.2 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE AÇÚCAR

O caldo clarificado proveniente da planta de tratamento pós-moendas passa por um processo de concentração para eliminação da água e produção dos cristais de açúcar (PELLEGRINI, 2009).

Camargo (1990) afirma que o processo de evaporação é o primeiro estágio de concentração de caldo clarificado. Sua principal função é a concentração de caldo com 14 a 17°Brix até uma solução com concentração de 60 a 70 Brix, conhecida como xarope.

Nas usinas brasileiras, o sistema mais utilizado é o sistema de evaporação de múltiplos-efeitos em correntes paralelas, ou seja, tanto caldo como vapor são alimentados no 1° efeito seguindo paralelos até o último efeito. Estes evaporadores são conhecidos como do tipo Robert. Estes sistemas são menos eficientes que os evaporadores de filme descendente, contudo a aplicação no Brasil deste último é ainda restrita (PELLEGRINI, 2009).

Devido à elevada viscosidade do xarope, não é possível mais concentrá-lo em evaporadores comuns. Assim, são utilizados equipamentos denominados cozedores, tachos, etc., semelhantes às caixas dos evaporadores, que trabalham individualmente sob vácuo e de forma descontínua ou contínua. A evaporação da água dá origem a uma mistura de cristais envolvidos em mel (solução açucarada) que recebe o nome de massa cozida. A massa cozida é enviada para as centrífugas, onde a força centrífuga separa os cristais de sacarose da solução. O processo é completado pela lavagem com água ou vapor ainda dentro do cesto. O mel removido é coletado em um tanque e retorna aos cozedores para recuperação do açúcar dissolvido ainda presente, até que se atinja um maior esgotamento do mesmo. A partir deste ponto, o mel passa a ser denominado mel final ou melaço e é enviado para a fabricação de álcool (PELLEGRINI, 2009).

Vale ressaltar que o açúcar extraído nas centrífugas tem um elevado grau de umidade, sendo enviado para os secadores antes de ser ensacado.

## 2.3 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ÁLCOOL

O processo de tratamento de caldo para a produção de álcool é um pouco diferente relativamente ao açúcar, necessitando a adição de compostos químicos apenas para a correção do PH. Embora, os processos de aquecimento se mantenham os mesmos. O processo de fermentação Melle-Boinot é comumente utilizado em usinas brasileiras. Parte do caldo clarificado é misturada com o mel final proveniente da fabricação de açúcar, formando o

mosto, a qual é enviado para as dornas de fermentação. O Brix do caldo enviado às dornas varia entre 16°Brix até 20°Brix dependendo da origem do mosto (maior para mostos mais ricos em caldo e menor para mostos ricos em mel final) (PELLEGRINI, 2009).

Na fase da fermentação, os açúcares são transformados em álcool, por reações ocorridas em tanques chamados dornas de fermentação, onde são misturados o mosto e o pé-de-cuba. Durante esta reação, em que ao final todo o açúcar é consumido e é liberada grande quantidade de gás carbônico, a solução é aquecida, formando ainda produtos secundários como os alcoóis superiores, o glicerol, aldeídos, etc. O produto final obtido neste processo de fermentação é chamado de vinho fermentado (PEIXOTO, 2010).

Ainda segundo Peixoto (2010), este vinho fermentado é enviado para as centrífugas, onde ocorre a recuperação do fermento. Este novo concentrado formado, chamado de vinho, possui em sua composição componente sólidos, como bagacilhos, leveduras e bactérias; líquidos, como o álcool, água e ácidos; e gasosos, como o gás carbônico. Para recuperação do álcool presente neste vinho, é realizado um processo de destilação, utilizando diferentes pontos de ebulição das diversas substâncias voláteis presentes, separando-as. Para esta operação, são realizados quatro processos, descritos na Figura 1.

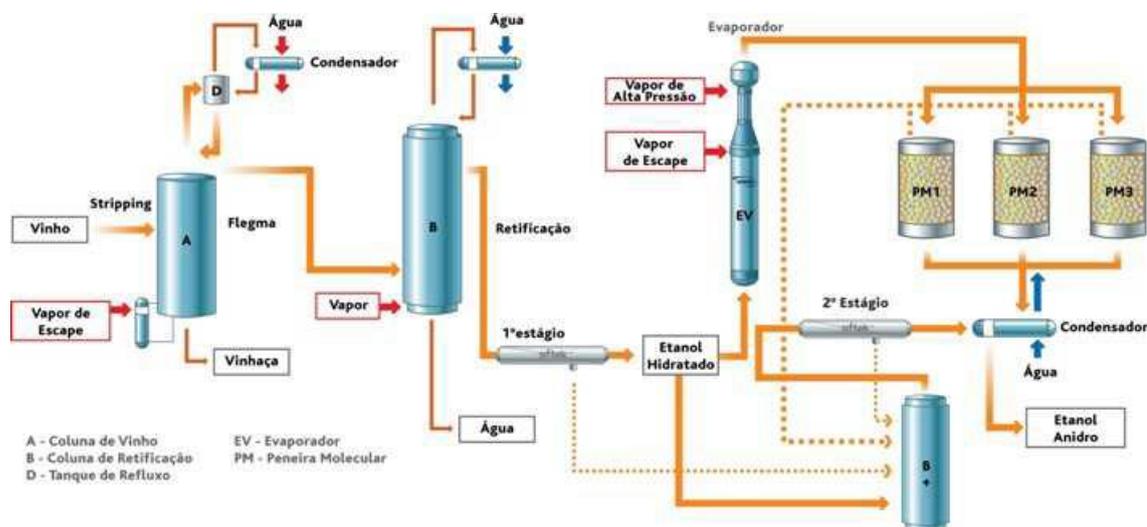


Figura 1 – Processo de produção de álcool.

Fonte: COPERSUCAR (2010).

O vinho é encaminhado para a coluna A, onde o etanol é separado do vinho e sai com a flegma e ainda são eliminadas as impurezas constantes. Em seguida, o vinho sofre o processo de epuração, sendo a flegma retirada da coluna A e enviada à coluna B. As substâncias voláteis (ésteres e aldeídos) presentes na coluna A com a flegma, são

simultaneamente enviados para a coluna D, sendo condensados e retirados como álcool de segunda linha. A vinhaça, restante na coluna A, é constituída essencialmente de água e sais sólidos, e pode ser utilizada na lavoura como fertilizante.

Na coluna B é realizado aquecimento através de injeção de vapor, objetivando concentrar a flegma e proceder com a sua purificação. Retiradas as impurezas da flegma neste processo, o produto obtido é o álcool hidratado, fechando o primeiro estágio de produção. No segundo estágio, que continua a partir daí, o etanol hidratado é encaminhado para o processo de destilação, na coluna EV, e, em seguida, pode seguir para um entre três processos distintos de desidratação. O processo aqui descrito é o mais utilizado, que consiste na utilização de ciclohexano, que é uma substância que possui a característica de alterar o ponto de ebulição do álcool, retirando a água do processo, que através da condensação é enviada para outra coluna onde ocorre a recuperação do ciclohexano que retorna ao processo de desidratação. O resultado final deste processo é o álcool anidro (PEIXOTO, 2010).

#### 2.4 COGERAÇÃO DE ENERGIA NO SETOR SUCROALCOOLEIRO

O termo “cogeração” é de origem americana e é empregado para designar os processos de produção combinada de energia térmica e potência, mecânica ou elétrica, com o uso da energia liberada por uma mesma fonte primária de combustível, qualquer que seja o ciclo termodinâmico. Normalmente, são usados os ciclos Rankine, que são aqueles que empregam turbinas a vapor, ou os ciclos Brayton, que utilizam turbinas a gás (FIOMARI, 2004).

Um aspecto relevante não considerado na definição, é que como não é viável, em grande parte dos casos, a compra de energia térmica de outra empresa, estes sistemas são projetados fundamentalmente para satisfazer a demanda térmica do consumidor. Além disso, a potência elétrica produzida pode atender parte ou totalidade da demanda, considerando também a possibilidade de comercialização de excedente desta energia (ARAÚJO, 2014).

De acordo com Pellegrini (2009), todas as usinas brasileiras são auto-suficientes com relação à geração de energia eletromecânica e calor para os seus processos. O bagaço gerado no sistema de extração é enviado para planta de utilidades, onde é queimado nas caldeiras, sendo 5% armazenado com reserva técnica para partidas do sistema. A foco do bagaço como um resíduo natural da produção de açúcar e álcool, levou os produtores a utilizarem processos que consumissem todo o bagaço, para evitar gastos desnecessários com o seu armazenamento e movimentação. Entretanto, a necessidade de redução de custos aliada a uma valorização dos subprodutos da cana, tornou a geração de bagaço excedente atraente ao setor.

Os sistemas de cogeração utilizados na maioria das usinas são baseados em caldeiras de geração de vapor a 21 bar e turbinas de contrapressão (escape a 2,5 bar). Aproximadamente, 50% do vapor necessário no processo é expandido nas turbinas de acionamento das moendas, cuja eficiência isoentrópica é inferior a 60%. A energia elétrica necessária é gerada em turbogeradores com eficiências isoentrópicas entre 60- 65%. Ainda, as bombas de água de alimentação da caldeira e os turboexaustores também são acionados por turbinas de simples estágio, com baixas eficiências. Mesmo com a baixa eficiência das turbinas, dado o consumo de vapor elevado no processo, faz-se necessário o uso de válvulas de expansão (PELLEGRINI, 2009).

De acordo com Araújo (2014), no setor sucroalcooleiro o sistema de cogeração aparece vinculado a três configurações fundamentais de turbinas a vapor:

- Turbinas de contrapressão;
- Turbinas de extração-condensação;
- Combinação de turbinas de contrapressão com outras de condensação que empregam o fluxo excedente.

A Figura 2 ilustra um ciclo completo utilizado numa planta.

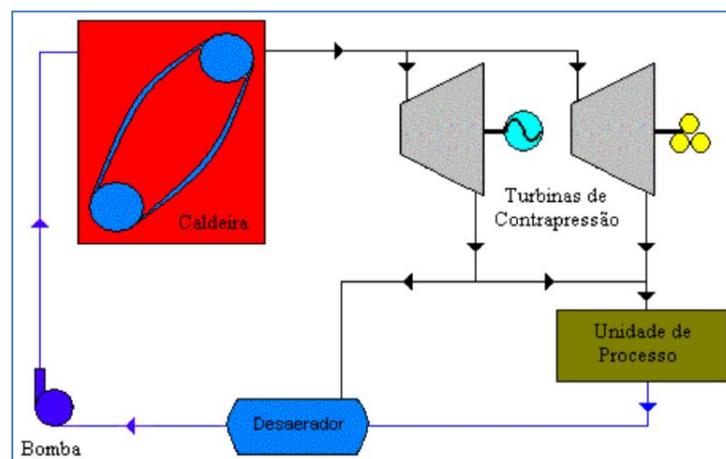


Figura 2 – Diagrama de um sistema de cogeração com turbina a vapor.

Fonte: COPERSUCAR (2010).

Assim, um sistema de cogeração fica constituído por uma combinação de equipamentos convencionais dentro da engenharia energética (caldeiras, turbinas, trocadores de calor e outros) que, integrados funcionalmente numa determinada planta, procurando obter o maior aproveitamento da fonte primária de energia (ARAÚJO, 2014).

## 2.5 EFICIÊNCIAS TÉRMICAS PELA PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA

A eficiência termodinâmica baseada na primeira lei para dispositivos que produzem potência relaciona o trabalho realizado no volume de controle com o trabalho produzido em um processo hipotético isentrópico desde o mesmo estado de entrada até a mesma pressão de saída. Nas turbinas reais o trabalho é calculado com base no trabalho realizado nas turbinas ideais, multiplicando-se pela eficiência da turbina. Para o caso de bombas e compressores, a eficiência pela primeira lei é definida de maneira inversa (ARAÚJO, 2014).

Já em relação às caldeiras, Araújo (2014) afirma que o cálculo da eficiência pela primeira lei de caldeiras convencionais relaciona a potência térmica gerada na caldeira proveniente da queima do bagaço e a potência térmica entregue ao ciclo termodinâmico. Considerando que a vazão de água de alimentação e de vapor de saída seja a mesma, pode-se substituir a potência térmica entregue ao ciclo termodinâmico pela diferença entre as entalpias do fluido na entrada e saída do volume de controle multiplicado pela vazão de vapor na saída. Além disso, pode-se substituir a potência gerada na caldeira através da queima do bagaço pela vazão de bagaço consumido na caldeira multiplicado pelo seu poder calorífico inferior.

## 2.6 MOTORES DE INDUÇÃO

As máquinas assíncronas são denominadas máquinas de indução porque a tensão do rotor, responsável por produzir a corrente do rotor e o campo magnético do rotor, é induzida nos enrolamentos do rotor em vez de ser fornecida por meio de uma conexão física de fios. A não necessidade de uma corrente de campo CC para o motor funcionar é a característica principal que diferencia as máquinas de indução das demais (CHAPMAN, 2013).

As máquinas de indução são usualmente referidas como motores de indução. De acordo com Chapman (2013), isto se dá pois as mesmas são utilizadas quase sempre como motores. Seu uso como gerador apresenta muitas desvantagens, sendo útil apenas em aplicações especiais.

Um motor de indução fisicamente possui o mesmo estator de uma máquina síncrona, entretanto a construção do rotor é diferente. Há dois tipos de rotores empregados em motores de indução: o rotor gaiola de esquilo e o rotor bobinado. O rotor gaiola de esquilo consiste de uma série de barras condutoras que são encaixadas dentro de ranhuras na superfície do rotor e postas em curto-circuito em ambas as extremidades por grandes anéis de curto-circuito. Essa

forma construtiva é denominada gaiola de esquilo porque os condutores examinados isoladamente assemelham-se as rodas nas quais os esquilos ou hamsters correm fazendo exercício (CHAPMAN, 2013).

O rotor bobinado, por outro lado, possui um conjunto completo de enrolamentos trifásicos que são similares aos enrolamentos do estator. Os enrolamentos do rotor são colocados em curto-circuito por meio de escovas que se apoiam em anéis deslizantes, sendo as correntes no rotor acessadas por meio dessas escovas. Os motores de indução de rotor bobinado exigem muito mais manutenção devido ao desgaste associado as suas escovas e anéis deslizantes. Como resultado, estes motores apresentam maior custo que os motores de indução de gaiola de esquilo, sendo raramente utilizados (CHAPMAN, 2013).

## 2.7 GERADORES ELÉTRICOS

As máquinas elétricas são geradores que convertem energia mecânica em energia elétrica e motores que convertem energia elétrica em energia mecânica. O princípio de funcionamento de uma máquina elétrica baseia-se na geração de tensões elétricas em enrolamentos ou grupos de bobinas quando esses giram mecanicamente dentro de um campo magnético, ou quando um campo magnético gira mecanicamente próximo à esses enrolamentos. Desta maneira, o fluxo concatenado em uma bobina específica é alterado ciclicamente e uma tensão variável no tempo é gerada (FITZGERALD et al, 2006).

De acordo com Fitzgerald et al (2006), denomina-se enrolamento de armadura o grupo dessas bobinas conectadas em conjunto. Em máquinas de corrente alternada (CA), os enrolamentos de armadura alojam-se tipicamente na parte estacionária do motor, chamada de estator. Tipicamente, as máquinas CA apresentam um segundo enrolamento, ou conjunto de enrolamentos, que conduz corrente contínua e é utilizado para produzir o fluxo principal de operação da máquina, sendo referido como enrolamento de campo. O enrolamento de campo de uma máquina CA encontra-se na parte rotativa do motor, conhecida como rotor.

Na maioria das máquinas elétricas, o estator e o rotor são feitos de aço elétrico e alojam ranhuras nas quais são instalados os enrolamentos. O uso de um material de alta permeabilidade como esse, maximiza o acoplamento entre as bobinas e aumenta a densidade de energia magnética associada com a interação eletromecânica (FITZGERALD et al, 2006).

Há duas classes principais de máquinas CA, as máquinas síncronas e as máquinas assíncronas (ou de indução). Nas máquinas síncronas, a corrente de campo magnético é fornecida por uma fonte de potência de corrente contínua (CC) separada, enquanto nas

máquinas assíncronas essa corrente de campo magnético é fornecida por indução magnética (ação de transformador) em seus enrolamentos de campo (CHAPMAN, 2013).

Nos geradores síncronos, a frequência elétrica produzida está sincronizada ou vinculada à velocidade mecânica de rotação do gerador. Tipicamente, a potência elétrica é gerada em 50 Hz ou 60 Hz, de modo que o gerador deve girar com uma velocidade fixa, dependendo do número de polos da máquina (CHAPMAN, 2013).

A Figura 3 mostra esquematicamente um gerador monofásico de quatro polos. As bobinas de campo são ligadas de modo que os pólos tenham polaridades alternadas. O enrolamento de armadura então é constituído de duas bobinas,  $a_1$ ,  $-a_1$  e  $a_2$ ,  $-a_2$  ligadas em série pelos seus terminais de conexão. Nesse caso, a tensão elétrica gerada passa por dois ciclos completos a cada revolução do rotor. A frequência elétrica gerada é assim o dobro da frequência mecânica de rotação do rotor.

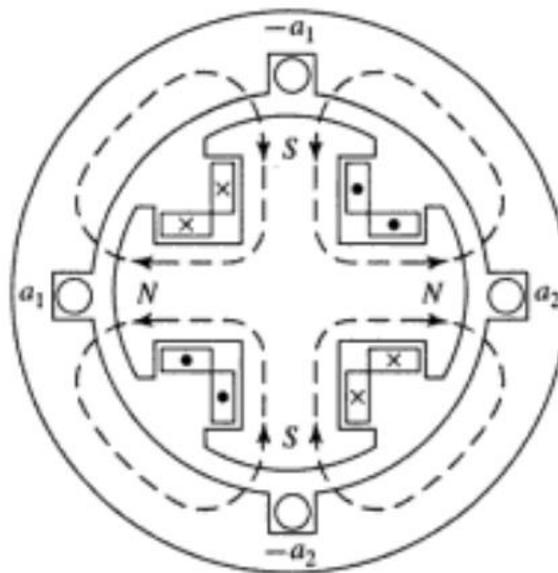


Figura 3 – Vista esquemática de um gerador simples, síncrono, monofásico e de quatro pólos.

Fonte: (FITZGERALD et al, 2006).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nessa seção estão apresentados aspectos inerentes às vantagens e desvantagens técnicas, economia de vapor, economia de bagaço, potencial de cogeração, bem como ao custo de aquisição.

#### 3.1 VANTAGENS E DESVANTAGENS TÉCNICAS

As vantagens técnicas de cada equipamento são observadas na utilização e inerentes de cada equipamento. No estudo, foi observado o funcionamento de turbinas à vapor de simples estágio que foram substituídas por motores elétricos de 1000 CV de potência da marca WEG. A substituição foi feita mantendo o sistema de transmissão (um redutor de alta seguido por um redutor de baixa), assim, não alterando a eficiência mecânica do sistema.

#### 3.2 ECONOMIA DE VAPOR

As medidas e valores foram obtidos diretamente nos equipamentos e indicadores da usina. Para explicar sobre a economia de bagaço, é necessário a demonstração dos últimos dados obtidos com o uso de turbinas de simples estágio nos acionamentos e os dados utilizando motores.

#### 3.3 ECONOMIA DE BAGAÇO

Em relação a economia de bagaço, vale salientar que a mesma está diretamente ligada a economia de vapor.

#### 3.4 POTENCIAL DE COGERAÇÃO:

O potencial de cogeração foi avaliado utilizando dados medidos e projetando possibilidades baseadas nesses dados.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados referentes a metodologia proposta.

### 4.1 VANTAGENS E DESVANTAGENS TÉCNICAS

As turbinas utilizadas na usina observam são turbinas de simples estágio, que tem como vantagens o baixo preço de aquisição e manutenção simples. São máquinas ultrapassadas, sendo as turbinas de múltiplo estágio mais recente. A grande desvantagem está na baixa eficiência termodinâmica, em torno de 35% (PROCKNOR, 2004). Com exceção dos rotores, todas as peças das turbinas são de fácil reposição em caso de quebra, algumas delas podendo ser feitas na própria usina, caso está esteja equipada com uma oficina industrial com os equipamentos necessários. A durabilidade, com o uso de vapor de alta qualidade, também é uma grande vantagem da turbina, podendo ser usadas por décadas.

Como mencionado, o rendimento térmico da turbina de simples estágio é sua grande desvantagem, como elas trabalham com contrapressão, pois o vapor servido é usado no processos de fabricação, tem-se aí uma perda no rendimento. Outros fatores que influenciam são: vedação do sistema, desgaste dos componentes, qualidade do vapor (presença de água no estado líquido, areia ou outras impurezas), pressão de entrada. A necessidade de linhas de vapor também pode ser considerada uma desvantagem, pois, da saída da caldeira até a entrada da turbina, há perda de carga e possibilidade vazamentos de vapor em alta pressão. A alta vibração mecânica gerada pela turbina também pode ser considerada uma desvantagem. No caso de turbinas maiores, é indicado que tenha a base separada da base do prédio, para evitar danos decorrentes da vibração constante.

Devido à necessidade de variação de rotação dos tambores da moenda (para aumentar ou diminuir a capacidade de moagem), os motores elétricos são instalados juntamente com inversores de frequência, que permitem o ajuste em uma faixa de rotações que varia com a demanda da produção.

Vantagens: Com uma eficiência na faixa de 96% (PROCKNOR, 2004), os motores elétricos apresentam um rendimento extremamente satisfatório. Mesmo considerando o rendimento global (Turbina-gerador, cabos de força e Inversor), que fica em torno de 67% (PROCKNOR, 2004) consideravelmente maior que o da turbina de simples estágio. A menor necessidade de espaço para instalação também é uma grande vantagem, uma vez que o equipamento é mais compacto e não há a necessidade de linha de entrada e saída de vapor,

nem de trocadores de calor para resfriamento do óleo de lubrificação. Uma vez que o controle de rotação é feito eletronicamente, através do inversor, fica mais fácil e mais preciso que o controle através de válvulas de entrada de vapor. Pode-se dizer também que o controle, por ser remoto, é mais seguro que o da turbina. Outra grande vantagem da eletrificação (substituição de turbinas por motores) dos equipamentos de preparo e das moendas é o potencial para automação do sistema, podendo associar a demanda de caldo no processo com as rotações dos rolos e esteiras, além de paradas de emergência devido a imprevistos.

Outras etapas do processo podem ser associadas aos inversores, aumentando ou diminuindo a velocidade ou até mesmo interrompendo o funcionamento.

Entre as outras vantagens:

- Partidas suaves e sem trancos (para motores com inversores de frequência)
- Não necessita de resfriamento líquido
- Proteção do motor, do sistema mecânico e paradas de emergência ligadas diretamente no inversor.
- Sem oscilações na extração do caldo devido a quedas de pressão nas linhas de vapor.

Desvantagens: A maior desvantagem observada na instalação dos motores elétricos foi a necessidade de um espaço razoavelmente grande para a instalação dos quadros elétricos, de automação e dos inversores de frequência. Além de ser necessária a construção de uma estrutura (sala) que necessita ser isolada de impurezas e climatizada, há também a necessidade de uma área destinada à instalação dos transformadores.

A manutenção, apesar de ser praticamente resumida à troca de componentes de desgaste, como as escovas, e limpeza, quando necessária, costuma ser mais complexa, com a necessidade de profissionais especializados.

É necessário a instalação de cabos de alta tensão, além disso, dependendo das instalações originais, possibilidade da necessidade de um gerador maior, pois o consumo de energia aumentará consideravelmente.

## 4.2 ECONOMIA DE VAPOR

A figura 4 mostra a disponibilidade máxima de potencia no preparo (picador e desfibrador) e na moagem (5 ternos de moenda) e o respectivo consumo.

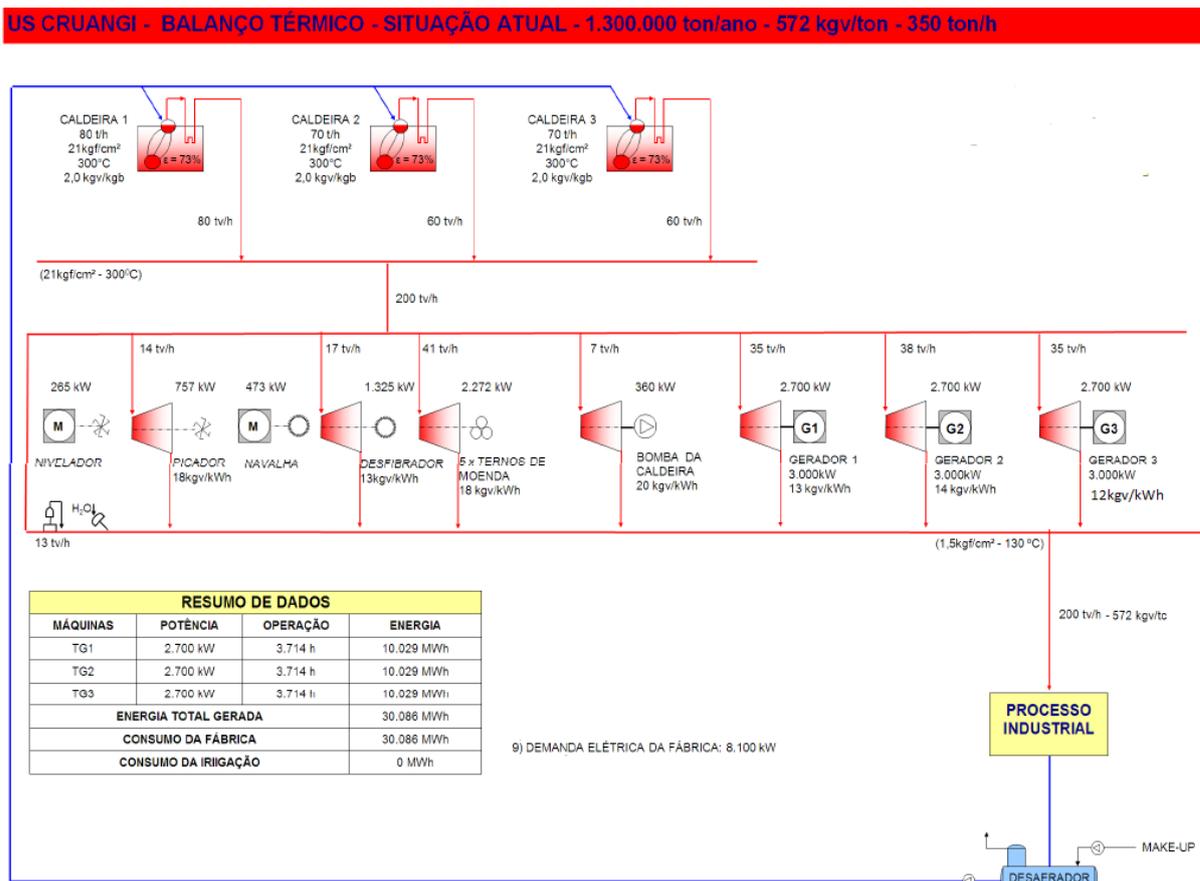


Figura 4 – Balanço térmico.

Fonte: Cruangi

Na situação com acionamentos realizados por turbina, a demanda elétrica da fábrica é de 8,100 kW, e é suprida por três turbo-geradores, cada um podendo fornecer no máximo 3000 kW, 9000kW no total. Nota-se que para uma substituição das turbinas por motores elétricos, é necessário antes uma substituição de um ou mais geradores por outro de maior potencia. Em termos de economia de vapor, o ganho vai ser consequencia de um maior rendimento termico das turbinas de multiploestágio, usadas no turbo-gerador, em relação as de simples estagio utilizadas no acionamento. Ficam claro que as turbinas com pior rendimento são as do acionamento da moenda e do picador, então, elas são a escolha óbvia para serem substituidas por motores elétricos.

Quando somados os consumos do picador, dos 5 ternos de moenda, da bomba da caldeira e do gerador G3, temos 97tv/h. Com a substituição do G3 por um gerador de 6000kW de potencia, temos um consumo de 72tv/h, que representa uma economia de 25tv/h. Como pode ser visto na Figura 5.

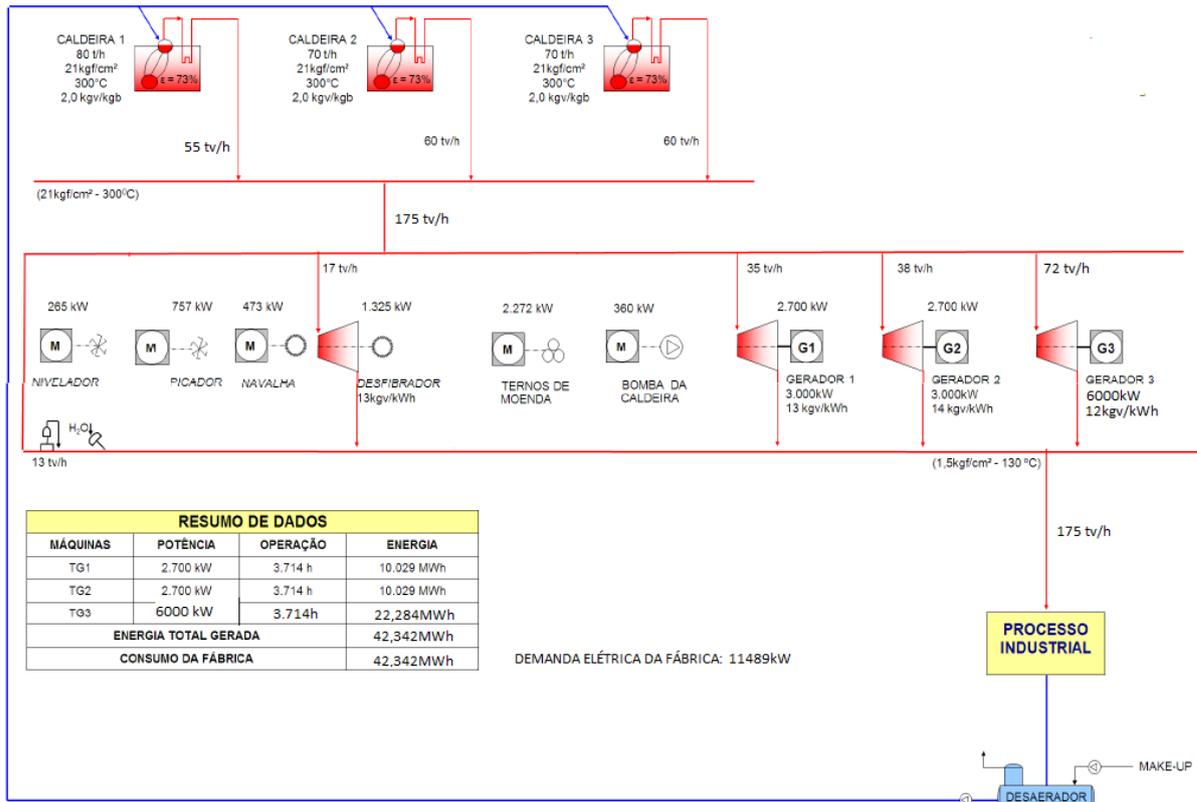


Figura 5 – Balanço térmico visando economia de vapor.

Fonte: Cruangi

### 4.3 ECONOMIA DE BAGAÇO

Segundo medições, 1kg de bagaço produz 2,1kg de vapor, ou seja 1t de bagaço produz 2,1t de vapor. No arranjo atual, com a produção de 200t por hora de vapor, é necessário 95,24t de bagaço por hora, que, em 3714 horas funcionamento resulta em consumo total de 353721 toneladas de bagaço consumidas. Com a substituição, e uma produção de 175t de vapor por hora, o consumo de bagaço será de 83,33 toneladas de bagaço por hora, com um total de 309487 toneladas de bagaço no período de moagem. A economia resultante é de 44234 toneladas de bagaço. O bagaço resultante da economia, além de ser usado no início do processo de moagem, como estoque, pode ser vendido. Para venda, o preço varia, tendo atingido 150 reais à tonelada em 2015 e 30 reais no primeiro semestre de 2016 (CANAONLINE, 2016), e segundo as últimas vendas realizadas pela usina, o preço mais atualizado na região é de 80 reais à tonelada.

### 4.4 POTENCIAL DE COGERAÇÃO

Para ser possível a cogeração de energia, é necessário um considerável investimento inicial, pois seria necessário a compra de geradores de maior potência, assim como de caldeiras com maior capacidade. A geração de vapor, em alguns casos poderia ser maior que o consumo de vapor servido pela produção, então, também seria necessário a compra de uma turbina de condensação com extração controlada para evitar o desperdício de vapor.

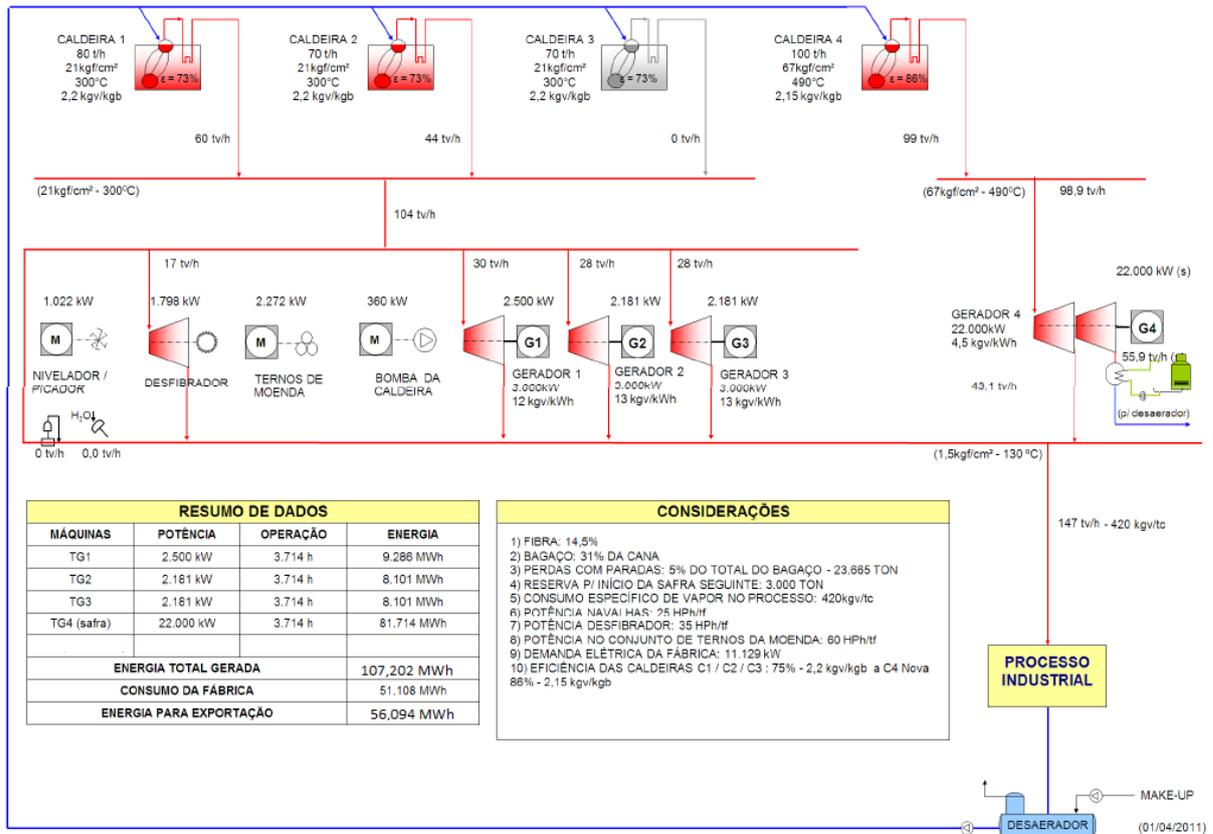


Figura 6 – Balanço térmico visando cogeração.

Fonte: Cruangi

Investimento necessário nessa situação:

- Instalação de uma caldeira de 100 Ton/h - 67 bar – 490°C
- Instalação de um turbo-gerador de condensação com extração controlada de 22 MW
- Subestação Elevadora 25 MVA, 20km LT 69kV
- Motorização da MOENDA, do picador e da Bomba de Alimentação da Caldeira.

Com uma produção total de 203 tv/h, não muito superior ao atual, associado ao uso de uma turbina de condensação, permite um controle sobre a extração de vapor servido de acordo com a demanda do processo, evitando desperdícios em caso de baixa demanda. A energia total produzida durante o período de funcionamento é de 236.775MWh, com um consumo de 51.106MWh e uma importação de exportação de 110.000MWh. Nesse caso, o desfibrador continua sendo acionado por turbina devido ao rendimento da turbine ser mais ato que as outras e o alto custo de um motor elétrico com a potencia necessário.

## CONCLUSÃO

O estudo proposto consistiu de três cenários, o atualmente utilizado pela usina, com acionamentos do preparo e da moagem de cana realizados por turbinas a vapor de simples estágio, o cenário voltado apenas para economia de vapor, sem considerar a possibilidade de cogeração e um terceiro onde o objetivo é a cogeração.

Dos resultados obtidos pode-se concluir que:

Na situação voltada para a economia de vapor, será necessário investimento em um novo gerador de maior potência e em motores elétricos, além de estações de transformadores, quadros elétricos e cabos. O ganho será devido ao maior rendimento da turbina de múltiplo estágio que aciona o gerador em comparação com a de simples estágio utilizada nos acionamentos. Além de todas as vantagens técnicas da eletrificação já mencionadas, há um considerável ganho na eficiência térmica no preparo e moagem de cana, resultando em uma economia de vapor, que, devido à limitação dos geradores, resultará em pouco ou nenhum ganho em termos de cogeração de energia. No entanto, é necessário um investimento para reduzir o consumo de vapor por parte do processo, pois, se não houver uma redução, o vapor direto produzido pela caldeira irá ser usado no processo, sendo feito o uso de uma válvula de redução de pressão, que é, de certa forma, um desperdício de energia potencial contida no vapor sob pressão. O retorno monetário poderá ser visto na venda do bagaço economizado no processo, na possibilidade de redução do quadro de funcionários devido à automatização do processo e no aumento do rendimento geral, devido a uma maior confiabilidade.

Na situação onde a cogeração é considerada, é necessário um investimento consideravelmente maior, pois, além do investimento em motores elétricos, transformadores e cabos de alta tensão, será necessária uma caldeira com maior capacidade de produção e principalmente, que produza um vapor com maior pressão. Também será necessário a compra de uma turbina de condensação com extração controlada, pois, possui um alto rendimento ao mesmo tempo em que permite a extração de vapor de baixa pressão, de acordo com a demanda do processo. Um gerador com alta capacidade de geração também será necessário, além da construção de um condensador e desareador independentes, apenas para uso do conjunto turbo-gerador. O retorno monetário será obtido com a venda de energia para a concessionária local.

## REFERÊNCIAS

ARAÚJO, B. C; 2014, “Simulação de uma usina sucroalcooleira utilizando uma ferramenta na plataforma Matlab”, **Monografia, UFRJ**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CAMARGO, A. C. (Coord.) **Conservação de Energia na Indústria do Açúcar e do Álcool**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), 1990. 796 p.

CANAOLINE. **Preço do bagaço de cana começa a reagir**. Disponível em: <<http://www.canaonline.com.br/conteudo/preco-do-bagaco-de-cana-comeca-a-reagir.html#.W9JI0ntKipo>>. Acesso em: 18 de outubro de 2018.

COOPERSUCAR. **Produção do Açúcar e do Etanol**. Disponível em: <<http://www.copersucar.com.br/hotsite/2010/>>. Acesso em: abril de 2018.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

FIOMARI, M. C; 2004, “Análise Energética e Exergética de uma Usina Sucroalcooleira do Oeste Paulista com Sistema de Cogeração de Energia em Expansão”, **Tese de doutorado, UNESP**, Ilha Solteira, SP, Brasil.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., C.; UMANS, S. D. **Máquinas elétricas: Com introdução à eletrônica de potência**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

LIBONI, L. B; 2009, “Perfil da mão-de-obra no setor sucroalcooleiro: tendências e perspectivas”, **Tese de doutorado, USP**, São Paulo, SP, Brasil.

PEIXOTO, G. A; 2010, “Análise da estrutura e padrão de concorrência do setor sucroalcooleiro no Brasil”, **Monografia, UFSC**, Florianópolis, SC, Brasil.

PELLEGRINI, L. F; 2009, “Análise e otimização termo-econômica-ambiental aplicada à produção combinada de açúcar, álcool e eletricidade”, **Tese de doutorado, USP**, São Paulo, SP, Brasil.

PROCKANOR. **Acionamentos para moendas**. Disponível em:

< <https://www.procknor.com.br/br/artigos/acionamentos-para-moendas> >. Acesso em: 20 de outubro de 2018.

TONETO JR.; LIBONI, L.B. Estudo da competitividade da indústria paulista: setor sucroalcooleiro. Nota técnica 2. **Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT)**. São Paulo, 2007.

UNICA. **Portal da União da Agroindústria Canavieira**. São Paulo, 2008. Disponível em: <[www.unica.com.br](http://www.unica.com.br)>. Acesso em: abril de 2018.

UNICA. **Portal da União da Agroindústria Canavieira**. São Paulo, 2010. Disponível em: <[www.unica.com.br](http://www.unica.com.br)>. Acesso em: abril de 2018.