

FUNDAÇÃO DE ENSINO “EURÍPIDES SOARES DA ROCHA”  
CENTRO UNIVERSITÁRIO EURÍPIDES DE MARÍLIA – UNIVEM  
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**SAMANTA DE AZEVEDO TORRES**

**COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA ENTRE  
DIFERENTES BIOMASSAS PARA COGERAÇÃO DE ENERGIA  
ELÉTRICA: ESTUDO DE CASO APLICADO EM UMA USINA DE  
AÇÚCAR E ÁLCOOL**

MARÍLIA  
2015

FUNDAÇÃO DE ENSINO “EURÍPIDES SOARES DA ROCHA”  
CENTRO UNIVERSITÁRIO EURÍPIDES DE MARÍLIA – UNIVEM  
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**SAMANTA DE AZEVEDO TORRES**

**COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA ENTRE  
DIFERENTES BIOMASSAS PARA COGERAÇÃO DE ENERGIA  
ELÉTRICA: ESTUDO DE CASO APLICADO EM UMA USINA DE  
AÇÚCAR E ÁLCOOL**

Trabalho de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Produção da Fundação de Ensino “Eurípides Soares da Rocha”, mantenedora do Centro Universitário Eurípides de Marília – UNIVEM, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Produção.

Orientador:  
Prof. Fábio M. Zafra

MARÍLIA  
2015

Torres, Samanta de Azevedo

Comparação da eficiência energética entre diferentes biomassas para cogeração de energia elétrica: estudo de caso aplicado em uma usina de açúcar e álcool / Samanta de Azevedo Torres; orientador: Fábio Marciano Zafra. Marília, sp: [s.n.], 2015.

57 f.

Trabalho de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) - Curso de Engenharia de Produção, Fundação de Ensino “Eurípides Soares da Rocha”, mantenedora do Centro Universitário Eurípides de Marília –UNIVEM, Marília, 2015.

1. Cogeração de Energia Elétrica 2. Bagaço de cana-de-açúcar 3. Palha de cana-de-açúcar

CDD: 333.79




FUNDAÇÃO DE ENSINO "EURÍPIDES SOARES DA ROCHA"  
Mantenedora do Centro Universitário Eurípedes de Marília - UNIVEM  
Curso de Engenharia de Produção.


Samanta de Azevedo Torres - 47208-5

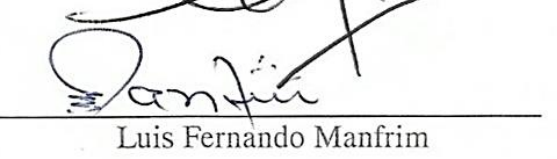
TÍTULO "Comparação da Eficiência Energética entre Diferentes Biomassas para Cogeração de Energia Elétrica: Estudo de Caso Aplicado em uma Usina de Açúcar e Alcool. "

Banca examinadora do Trabalho de Curso apresentada ao Programa de Graduação em Engenharia de Produção da UNIVEM, F.E.E.S.R, para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Produção.

Nota: 10,0

ORIENTADOR:   
Fabio Marciano Zafra

1º EXAMINADOR:   
Geraldo Cesar Meneghelo

2º EXAMINADOR:   
Luis Fernando Manfrim

Marília, 10 de dezembro de 2015.

*À Deus, por estar sempre ao meu lado me guiando e dando  
sabedoria para seguir na caminhada.  
Aos meus pais Sidnei e Antônia que sempre confiaram muito em  
mim, me apoiaram e me incentivaram em todas as horas.  
Ao meu irmão Felipe que está sempre me dando apoio e me  
alegando quando preciso.  
Aos amigos de trabalho por todo apoio.  
Dedico –lhes estas simples palavras de gratidão.*

## **AGRADECIMENTOS**

*Agradeço, primeiramente à Deus, por sempre estar ao meu lado, me dando coragem e sabedoria para enfrentar todas as dificuldades encontradas durante os cinco anos, e, por me mostrar que sou capaz, quando menos pensei ser.*

*Aos meus pais, Antonia Camargo e Sidnei de Azevedo Torres por acreditarem em mim e me darem este estudo, e, sempre estarem ao meu lado dando forças para não desanimar.*

*Aos meus avós, Olga Berto Camargo e Aparecido Camargo, que sempre se preocuparam muito comigo e me deram forças.*

*Ao meu irmão, Felipe Camargo que com seu jeito brincalhão, sempre me animou quando estava desanimada.*

*Ao meu namorado, Deivid Eder que esteve ao meu lado todos os dias, me apoiando, me compreendendo e me incentivando para continuar firme na caminhada.*

*Aos colegas de trabalho, que me proporcionaram total apoio durante estes anos.*

*Aos meus amigos de faculdade, Adeli, Anelise, Elson, Letícia, Leandro, Thalita e Thaise, que sempre estiveram juntos comigo, contribuindo com suas amizades e seus conhecimentos.*

*Ao meu orientador e professor Fábio Marciano Zafra, que meu deu suporte e contribuiu com seus conhecimentos para que fosse possível realizar este trabalho.*

*“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis. ”*

*José de Alencar.*

TORRES, Samanta de Azevedo. **Comparação da eficiência energética entre diferentes biomassas para cogeração de energia elétrica**: estudo de caso aplicado em uma usina de açúcar e álcool. 2015. 57 f. Trabalho de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) – Centro Universitário Eurípides de Marília, Fundação de Ensino “Eurípides Soares da Rocha”, Marília, 2015.

## RESUMO

A cogeração de energia elétrica através do bagaço e da palha da cana-de-açúcar desempenha um importante papel nas usinas sucroalcooleiras nos dias atuais por ser alto suficiente em energia elétrica, obtendo assim maior lucro para a usina. O presente trabalho tem por objetivo demonstrar através de uma análise quantitativa e estudo das propriedades das biomassas, que existe uma oportunidade de aumentar a utilização da palha da cana-de-açúcar, subproduto gerado pela própria empresa, em substituição do bagaço da cana-de-açúcar comprado de terceiros e desta forma alcançar um significativo ganho econômico. Para chegar aos resultados desejados, foi realizado um estudo de caso em uma usina de açúcar e álcool. Na safra 14/15 a empresa em questão constatou a necessidade de compra de 47.650,00 toneladas de bagaço, para suprir a alta demanda estabelecida para cogeração de energia elétrica no período analisado, com isso a empresa foi levada a investir R\$ 4.504.354,50 na compra deste subproduto. Realizando a substituição deste montante pela palha gerada e processada pela própria empresa, a economia final, sem nenhuma perda da capacidade de produção de energia elétrica na safra em questão, seria de R\$ 1.686.333,50.

**Palavras-chave:** Cogeração de energia elétrica. Bagaço de cana-de-açúcar. Palha de cana-de-açúcar.



TORRES, Samanta de Azevedo. Comparação da eficiência energética entre diferentes biomassas para cogeração de energia elétrica: estudo de caso aplicado em uma usina de açúcar e álcool. 2015. 57 f. Trabalho de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) – Centro Universitário Eurípides de Marília, Fundação de Ensino “Eurípides Soares da Rocha”, Marília, 2015.

#### ABSTRACT

The cogeneration of electricity through bagasse and straw sugarcane plays an important role in sugarcane mills these days for being high-sufficient in electricity, thus obtaining higher profit for the mill. This paper aims to demonstrate through quantitative analysis and study of the properties of biomass, there is an opportunity to increase the use of straw sugarcane by-product generated by the company, instead of bagasse from sugar cane -Sugar purchased from third parties and thus achieve a significant economic gain. To get the desired results, we performed a case study in a sugar mill and alcohol. 14/15 crop in the company in question noted the need for buying 47650.00 tons of bagasse, to meet the high demand established for electric power cogeneration in the reporting period, thus the company was taken to invest R \$ 4,504,354 50 the purchase of this by-product. Performing replacing this amount by straw generated and processed by the company, the final savings, without any loss of electricity generation capacity in the harvest in question, would be R \$ 1.686.333,50.

**Keywords:** Cogeneration of Electricity. Bagasse Sugarcane. Sugarcane Straw

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Classificações de Pesquisas .....	18
Figura 2: Seção transversal de um caule de cana .....	20
Figura 3: Potenciais de aproveitamento energético da cana-de-açúcar.....	22
Figura 4: Processo de Moagem, Fabricação de Açúcar, Etanol e Cogeração de Energia Elétrica.....	24
Figura 5: Produção da Região Norte/Nordeste definida a partir dos dados obtidos até 16/ago/2008 .....	25
Figura 6: Setor Sucroenergético .....	29
Figura 7: Perfil das principais fontes alternativas de biomassa no Brasil .....	31
Figura 8: Exemplo de Enfardadeira.....	34
Figura 9: Caminhão transportando os fardos de palha .....	34
Figura 10: Recolhimento da palha com Forrageira .....	34
Figura 11: Representação da caldeira flamotubular .....	37
Figura 12: Caldeira Flamotubular.....	37
Figura 13: Caldeira Aquatubular .....	38
Figura 14: Passagem de Vapor pela Turbina.....	39
Figura 15: Processo de Aleiramento, Enfardamento, Carregamento, Recolhimento e Transporte da Palha .....	45
Figura 16: Depósito de Palha Enfardada .....	45
Figura 17: Triturador de Palha.....	46
Figura 18: Triturador de Palha em Funcionamento.....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Faixa de valores analíticos.....	21
Tabela 2: Poder calorífico da Palha e do Bagaço .....	36
Tabela 3: Especificações Caldeira A .....	44
Tabela 4: Especificações Caldeira B .....	44
Tabela 5: Meta e Realizado Safra.....	47
Tabela 6: Geração e Consumo de Bagaço .....	47
Tabela 7: Custo Bagaço Comprado .....	48
Tabela 8: Custo Palha.....	48

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: A evolução do mercado brasileiro de etanol (bilhões de litros).....	26
Gráfico 2: Evolução da produtividade agrícola e industrial na produção de etanol.....	27
Gráfico 3: Evolução do mercado brasileiro de açúcar (milhões de toneladas) .....	28
Gráfico 4: Mix de produção safra 2014/2015.....	42
Gráfico 5: Mix de produção safra 2014/2015.....	42
Gráfico 6: Energia Gerada e Vendida na safra 2014/2015 .....	43

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CaSO<sub>3</sub> Sulfito de Cálcio

CTEEP Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista

Cenbio Centro Nacional de Referência em Biomassa

E-95 Aditivo que Promove a Ignição

ONS Operador Nacional do Sistema Elétrico

PCI Poder Calorífico Inferior

PCS Poder Calorífico Superior

VHP *Very High Polarization*

VHP PLUS *Very High Polarization Plus*

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Delimitação do tema.....	16
1.2 Objetivo .....	16
1.3 Objetivos específicos.....	16
1.4 Justificativa.....	17
1.5 Metodologia.....	17
1.6 Estrutura do trabalho .....	18
2 REVISÃO TEÓRICA .....	20
2.1 A cana-de-açúcar .....	20
2.2 Processos de moagem, fabricação de açúcar, etanol e cogeração de energia elétrica.....	22
2.2 O setor sucroenergético brasileiro .....	25
2.3 O etanol .....	26
2.4 O açúcar.....	28
2.5 Bioeletricidade.....	28
2.6 A cogeração de energia elétrica.....	30
2.7 Biomassa como combustíveis para caldeiras.....	30
2.7.1 Biomassa.....	30
2.7.2 O Bagaço da cana-de-açúcar .....	31
2.7.3 A palha da cana-de-açúcar.....	32
2.7.4 Poder calorífico do bagaço e da palha da cana-de-açúcar .....	35
2.8 Equipamentos utilizados na geração de energia elétrica .....	36
2.8.1 Caldeiras .....	36
2.8.1.1 Tipos de caldeiras .....	37
2.8.1.2 Vapor .....	38
2.8.1.3 Turbinas a vapor .....	39
2.8.1.4 Gerador elétrico .....	40
3 ESTUDO DE CASO: LEVANTAMENTO DE DADOS .....	41
3.1 Empresa .....	41

3.2 Metas e realizado safra 14/15 .....	47
4 RESULTADOS .....	49
4.1 Cálculos PCI do bagaço e da palha da cana-de-açúcar .....	49
4.3 Análise econômica.....	50
5 CONCLUSÃO.....	52
REFERÊNCIAS .....	54

## 1 INTRODUÇÃO

O potencial da cana-de-açúcar e os novos usos de seus subprodutos não param de crescer no setor sucroalcooleiro, como exemplos importantes têm-se o bagaço e a palha que podem ser utilizados para cogeração de energia elétrica. A cogeração de energia elétrica a partir destes subprodutos é tema muito presente nos estudos sobre energia no Brasil e tende a crescer cada dia mais nos próximos anos, pois utilizando este recurso, obtém-se redução no uso de combustível fóssil, não agride o meio ambiente e agrega-se um sistema de energia renovável de baixo custo.

Representando mais de 44% da matriz energética do país, o Brasil ganha destaque em utilizar grande parte de energia renovável. Os subprodutos da cana-de-açúcar são responsáveis por 15,7% de toda oferta de energia do país, fazendo com que a cana-de-açúcar ganhe um papel de grande importância no mercado (UNICA, 2015).

Cerca de 400 usinas sucroalcooleiras que realizam a queima do bagaço nas caldeiras, geram eletricidade suficiente para abastecer suas próprias atividades ao longo da safra, sendo assim, autossuficientes em energia elétrica. Além de cogerar energia elétrica para se auto sustentar, pouco mais de 100 usinas geram energia excedentes para comercializar, o que contribui muito com a renda do setor. Em 2011, 1.133 MW médios de bioeletricidade foram produzidos a partir do bagaço da cana-de-açúcar, significando de 2% a 3% da matriz elétrica do país. Estudos indicam que em 2020 estes valores poderão chegar a 18%, o que conseqüentemente, reduzirá a necessidade das usinas térmicas, que são movidas a energia fóssil, trabalharem (UNICA, 2015).

Devido a prática da queima da cana-de-açúcar contribuir para a degradação do meio ambiente, assim como, prejudicar a saúde da população, foi instituído a Lei Estadual Nº 11.241/2002, a qual decreta que a queima da cana-de-açúcar a partir de 2002 deve ser controlada e ter gradual eliminação com o passar dos anos, tornando-se 100% mecanizada até em 2021 em áreas mecanizável, e até em 2031 para áreas não mecanizáveis (BRASIL, 2002).

Com a implantação da lei banindo a queima da cana, foi necessário então introduzir a mecanização do corte da mesma, trazendo para as usinas sucroalcooleiras alguns benéficos, como, ter menos perda no corte, a palha que antes era queimada, hoje, é separada na mesma colhedora que corta a cana e soprada para o solo, e consegue-se cortar uma quantidade bem maior devido a rapidez.

Quando corta a palha e sopra para o solo, em seguida ela é enfardada por uma enfardadeira e levada até o depósito, se deixar grande quantidade desta palha no solo, o



mesmo fica úmido, fazendo com que desenvolva pragas que se alimentam da própria cana e acaba matando-a. Utilizando o processo de corte mecanizado, a geração de resíduos de palha e bagaço pode chegar até a 160 milhões de toneladas anuais, sendo 70,2 milhões de toneladas de bagaço e 87,7 milhões de toneladas de palha (JUNIOR; ALCARDE; RAMOS, 2015).

Nas usinas sucroalcooleiras, como é notado, a fonte de energia mais utilizada é vinda do bagaço, porém, algumas usinas já estão adotando o método de utilizar a palha da cana também como cogeneradora de energia elétrica, uma vez que ela é um subproduto mais barato que o bagaço e possui seu poder calorífico maior que o mesmo - 3.100 Kcal/kg a palha, 1,710 Kcal/kg o bagaço - significando um melhor rendimento (DEFILIPPI FILHO; 2013).

A cogeração a partir do bagaço frente a da palha da cana-de-açúcar, suas vantagens e desvantagens, serão abordadas neste trabalho, uma vez que são subprodutos de alta importância no setor sucroalcooleiro.

## **1.1 Delimitação do tema**

O presente trabalho irá analisar tecnicamente as biomassas bagaço e a palha da cana-de-açúcar e realizar um estudo para verificar a viabilidade econômica da palha na cogeração de energia elétrica.

## **1.2 Objetivo**

O objetivo geral deste trabalho é mostrar a viabilidade da palha consolidado ao bagaço da cana-de-açúcar para a geração de vapor onde é utilizado para a cogeração de energia elétrica.

## **1.3 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Analisar o processo atual de geração de vapor;
- Elaborar comparativo técnico sobre as biomassas propostas;
- Elaborar análise econômica;

## 1.4 Justificativa

Na empresa em que está sendo realizado o trabalho, pode-se perceber que possui a falta de bagaço para cogerar a quantidade de energia elétrica estimada, fazendo com que a mesma precise comprar este subproduto, aumentando o custo de cogeração. Devido a este problema, foi analisado que pode-se acrescentar junto ao bagaço, a palha da cana-de-açúcar para cogerar energia elétrica, a qual possui um poder calorífico melhor que o bagaço e consequentemente a produção terá melhor rendimento. Na safra 14/15, foi triturado 41.167,50 toneladas de palha de cana-de-açúcar. E foi comprado o total de 47.650 toneladas de bagaço de cana-de-açúcar, o que gerou um custo de R\$ 4.504.354,50. Com estas biomassas, mais o que havia em estoque, cogerou o total de 264.771,58 MWh de energia elétrica.

Com a realização deste estudo, pretende-se mostrar o quão vantajoso é cogerar com a palha da cana-de-açúcar e qual o aumento de faturamento e economia que traz para o setor.

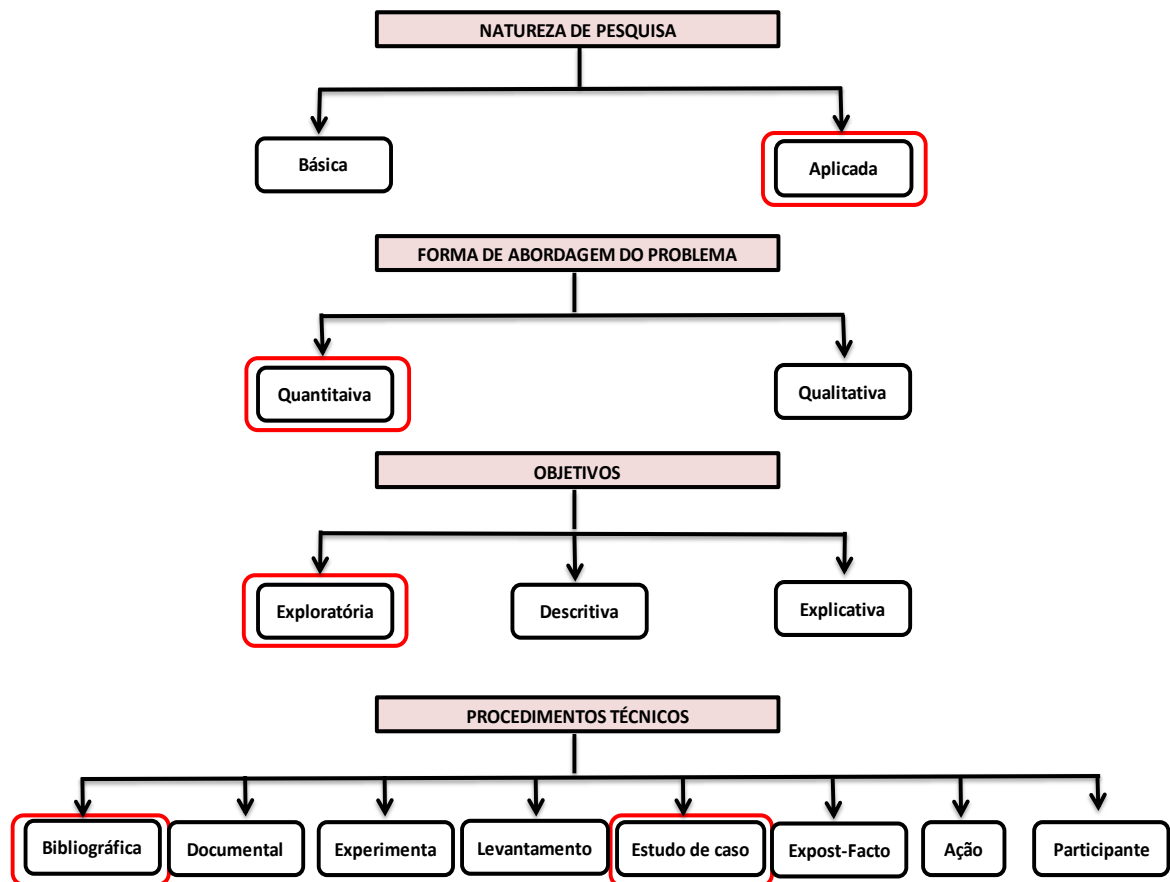
## 1.5 Metodologia

Esse trabalho será de natureza aplicada, utilizando uma forma quantitativa de abordagem onde tem como objetivo gerar conhecimentos para serem aplicados à solução do problema (SILVA;MENEZES; 2005).

O estudo realizado se classifica como pesquisa exploratória, como mostra a Figura 1, envolvendo levantamentos bibliográficos e entrevistas com pessoas que tiveram experiências práticas com a situação pesquisada.

O procedimento utilizado para o desenvolvimento do estudo são pesquisas bibliográficas a partir de livros, revistas, manuais de normas técnicas, artigos científicos, teses e monografias referentes ao sistema de cogeração de energia elétrica através da palha e do bagaço de cana-de-açúcar. Foi utilizado também fontes de sites específicos do assunto. E estudo de caso, onde foi realizado levantamento de dados através de boletins técnicos informativos utilizados na usina.

Figura 1: Classificações de Pesquisas



Fonte: Baseado em Silva e Menezes (2005)

## 1.6 Estrutura do trabalho

O trabalho realizado está dividido em vários capítulos onde são abordados assuntos referente a uma usina de produção de açúcar, etanol e cogeração de energia elétrica.

No Capítulo 1 contém a introdução, objetivo, os objetivos específicos, onde são abordados exatamente o que será realizado no trabalho, a justificativa da realização e a metodologia a ser utilizada no estudo.

No Capítulo 2 contém uma revisão bibliográfica onde descreve os principais conceitos ligados a produção de açúcar, etanol e cogeração de energia elétrica. Nesse capítulo é abordado sobre a cana-de-açúcar e suas características, como é realizado os processos de moagem, fabricação de açúcar, etanol e cogeração de energia elétrica, o setor sucroenergético no Brasil, a importância da bioeletricidade em nosso meio, o que é e como é a cogeração de energia, o que é biomassa e as regiões do país onde cada uma delas tem melhor

desenvolvimento, o poder calorífico inferior do bagaço e da palha da cana-de-açúcar e como é recolhido a palha do campo para utilização na usina.

No Capítulo 3 relata o estudo de caso, descrevendo os dados técnicos da empresa, a situação analisada e os procedimentos de coleta de dados.

No Capítulo 4 estão os resultados obtidos através dos cálculos, onde foram encontradas as quantidades de energia elétrica cogenerada através das biomassas e mostrada qual a economia gerada através da utilização da palha.

No Capítulo 5 é apresentada a conclusão o trabalho, onde mostram as vantagens em utilizar maior volume de palha para cogeração de energia elétrica e o resultado final obtido através do estudo realizado.

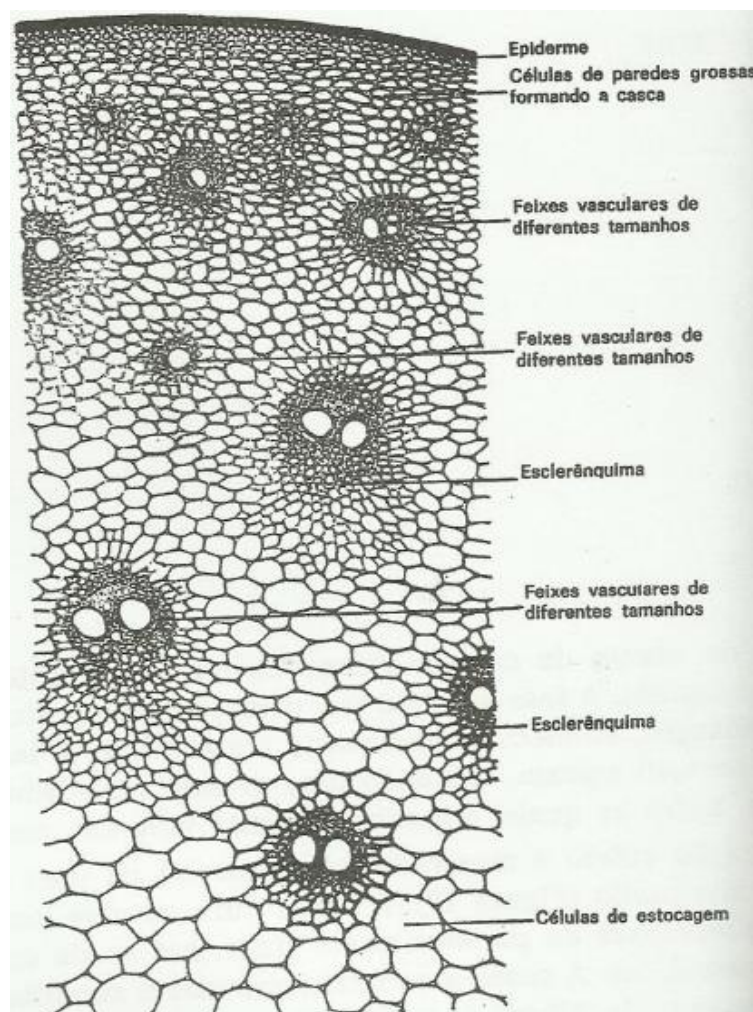
## 2 REVISÃO TEÓRICA

### 2.1 A cana-de-açúcar

O caule da cana-de-açúcar é constituído por um sistema de duas fases: sólida e líquida, onde, a fase sólida é um conjunto de celulose, lignina e pentosanas, conhecida usualmente como fibra da cana. Já a fase líquida, o que se chama de caldo, é uma solução aquosa que possui uma variedade grande de substâncias orgânicas, entre elas, cerca de 90% são sacarose (PAYNE; 1989).

A estrutura do caule é mostrada na Figura 2, representada por um desenho de uma seção transversal de um internódio.

Figura 2: Seção transversal de um caule de cana



A casca dura do caule da cana-de-açúcar é constituída por células parenquimatosas de paredes muito finas, nas quais estão encaixados os feixes vasculares. Segundo Payne (1989, p.212), “Na casca e nos feixes vasculares, constituem o que é chamado de “fibra” da porção fibrosa, enquanto, o tecido parenquimatoso, fino como uma folha, é conhecido como “medula”. ” São assim os dois tipos de materiais constituintes na fase sólida de um caule de cana, mencionado normalmente como fibra nas análises usuais realizadas.

O caldo de alta densidade e a pureza da cana-de-açúcar é armazenado nas paredes que o tecido parenquimatoso forma. Dentro dos sólidos feixes vasculares estão os vasos condutores, que se estendem por toda a planta, das raízes às folhas, tendo por finalidade mover a água e os nutrientes das raízes para todas as partes da planta, e o produto da fotossíntese é transloucado das folhas.

O conteúdo de fibras é mais alto na casca e nos nós, pois os feixes vasculares ficam mais próximos uns dos outros, e o caldo nessas regiões possui menor pureza e menos sacarose por apresentarem grandes quantidades de caldo vascular (PAYNE, 1989).

Segundo Payne (1989, p.212), “a faixa de valores analíticos para uma cana contendo em média 12,5% de fibra, 15,5% pol e 90 de pureza é mostrada na Tabela 1: ”

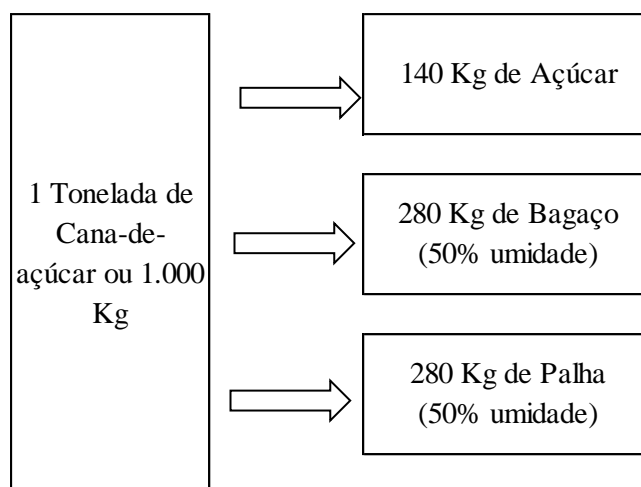
Tabela 1: Faixa de valores analíticos

	<b>Fibra (%)</b>	<b>Pol (%)</b>	<b>Pureza (%)</b>
<b>Internó</b>			
Seção da Casca	20 - 25	12 - 14	87 - 89
Parte Central	5,5-6,5	17-19	91 - 94
<b>Nó</b>			
Seção da Casca	13 - 14	10 - 10,5	75 - 76
Parte Central	11 - 12	13,5 - 14,5	86 - 88

Fonte: Adaptada do livro: Operações Unitárias na Produção de Açúcar de Cana, Payne, p.212

A cana-de-açúcar é uma biomassa na qual pode ser transformada praticamente por inteira em energia aproveitável através de uma série de processos industriais, onde, apresenta baixo impacto ambiental. Na Figura 3, indica os potenciais de aproveitamento energético desta biomassa:

Figura 3: Potenciais de aproveitamento energético da cana-de-açúcar



Fonte: Adaptada do material: UNICA e MME BEM 2006 (ano base 2005)

## 2.2 Processos de moagem, fabricação de açúcar, etanol e cogeração de energia elétrica

A cana é cortada por uma colheitadeira e levada através de um caminhão até a usina. Ao chegar na usina, o caminhão segue para a balança para efetuar a pesagem do mesmo. Alguns dos caminhões, depois que passam pela balança, seguem para a sonda de amostragem oblíqua para realizar a coleta de amostra de cana para análise do teor de sacarose. O teor da sacarose é o que orienta toda a gestão e o processo industrial (UNICA, 2015).

Após a pesagem do caminhão e o teste de laboratório, o mesmo segue para a descarga da cana nas mesas alimentadoras através de um hilo<sup>1</sup>, seguindo para os picadores e desfibradores, sem que aconteça perda do caldo. Em seguida, a cana passa pelo eletroímã para ser retirado os pedaços de metais que contém no meio da mesma e que podem danificar os equipamentos dos processos seguintes da moenda. Posteriormente, a cana desfibrada é enviada para os ternos da moenda, onde acontece a extração do caldo (NOVA CANA, 2015). Esta seção da fábrica tem como finalidade limpar, abrir as células da cana (ao menos 82% das células da cana devem estar abertas para que se obtenha uma boa eficiência na extração) e extrair o caldo com um mínimo de perda de açúcares possível, e também, reduzir a umidade final do bagaço (USINA SÃO FERNANDO, 2015).

<sup>1</sup> Equipamento mecânico usado nas usinas de açúcar e álcool para descarregar os caminhões de cana.

O caldo resultante da moagem contém grande quantidade de impurezas que necessitam ser reduzidas, para que seja utilizada de forma a obter boa qualidade no processo da fábrica de açúcar e da destilaria, sendo assim, o caldo passa por um tratamento, onde a primeira fase é destinada à remoção dos sólidos insolúveis (areia, argila, bagacilho, etc.), por meio de peneiras. A segunda fase é o tratamento químico, que tem por objetivo remover as impurezas insolúveis que não foram eliminadas na fase anterior e as impurezas coloidais e solúveis. Este processo destina-se à coagulação, floculação e precipitação destas impurezas, que são eliminadas por sedimentação. É necessário fazer também, a correção do pH afim de evitar inversão e decomposição da sacarose (NOVA CANA, 2015).

Depois do caldo já tratado, ele pode ser enviado para utilização na fábrica de açúcar e na destilaria, para a produção de etanol. Na fabricação de açúcar, é obrigatório o caldo passar pela etapa de sulfitação, onde tem como principal objetivo inibir reações que causam formação do precipitado sulfito de cálcio ( $\text{CaSO}_3$ ) e diminuir a viscosidade do caldo e do xarope, massas cozidas e méis, afim de facilitar as operações seguintes que são de evaporação e cozimento, locais onde o caldo encorpa virando mel, e transforma em cristais de açúcar (NOVA CANA, 2015).

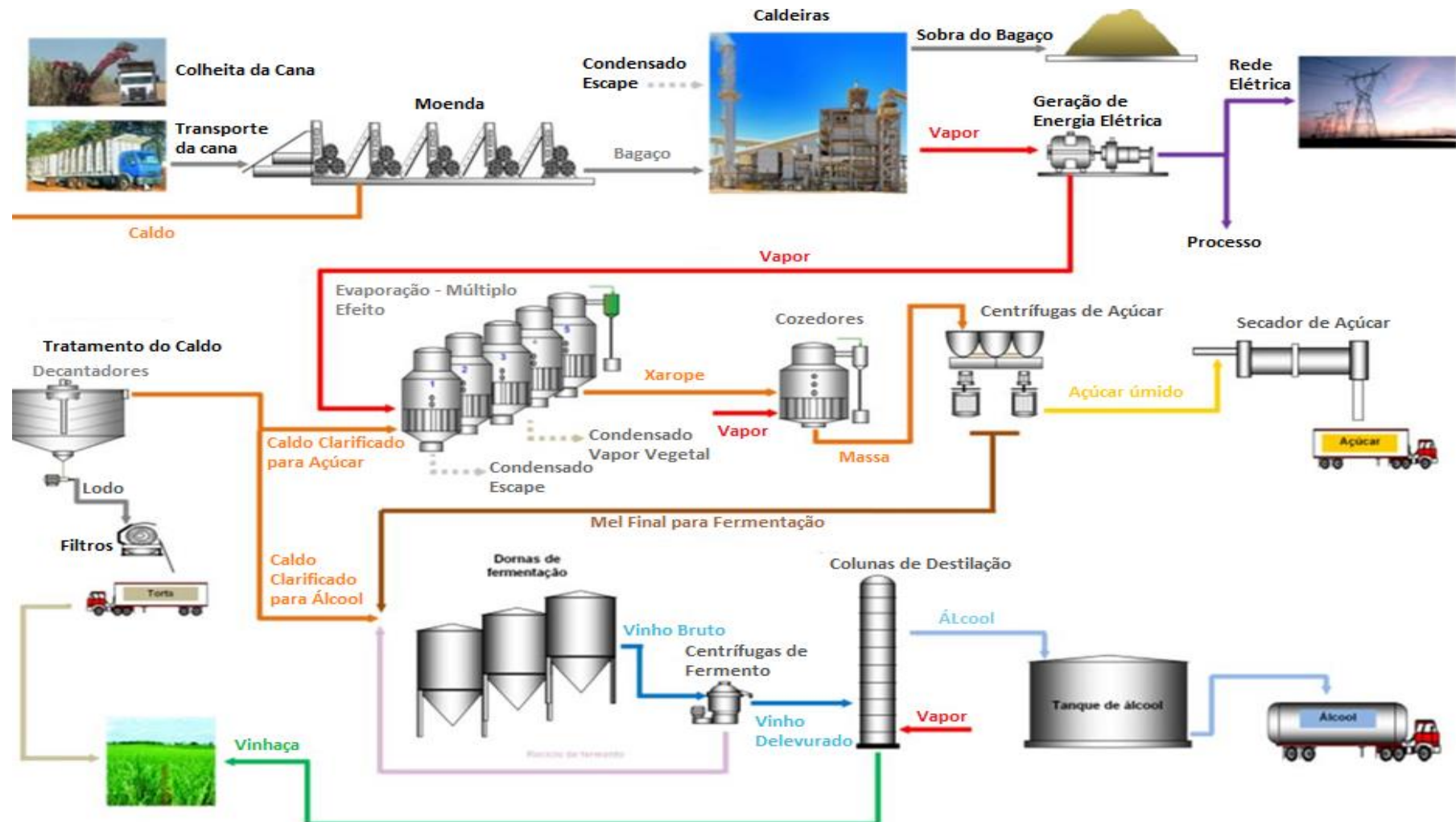
Na destilaria para a produção de etanol, o caldo é purificado por vários processos de filtração onde é formado o mosto, que é fermentado e misturado com leveduras, nesta etapa o líquido é chamado de vinho fermentado. O álcool deste vinho é recuperado em colunas de destilação e retificação, onde surge o etanol hidratado utilizado nos carros, para obter o etanol anidro, que é misturado a gasolina, é preciso mais uma etapa de desidratação ou remoção de água (USINA SÃO FERNANDO, 2015).

Da extração da cana resulta também o bagaço, que é enviado através de esteiras cobertas até as caldeiras, onde é queimado e produzido o vapor que é utilizado para cogeração de energia elétrica (USINA SÃO FERNANDO, 2015).

A cogeração de energia elétrica nas usinas sucroalcooleiras tem sido muito importante, pois é capaz de suprir a necessidade de consumo interno, e o excedente, é comercializado junto às distribuidoras de energia elétrica, além de que o modo em que é cogera esta energia elétrica, não agride o meio ambiente (SOUZA, 2002).



Figura 4: Processo de Moagem, Fabricação de Açúcar, Etanol e Cogeração de Energia Elétrica



Fonte: Própria Empresa

## 2.2 O setor sucroenergético brasileiro

O setor sucroenergético está em constante evolução tecnológica desde a década de 1970. Hoje em dia, a cana-de-açúcar é considerada um insumo primordial para o país, pois possui ampla variedade de produtos de valor agregado, incluindo, alimentos, biocombustíveis, eletricidade, que são resultantes de biorrefinarias modernas que produzem etanol, açúcar e bioeletricidade. Entre todos os países, o Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar, atingindo um volume recorde de aproximadamente 496 milhões de toneladas de cana-de-açúcar processados em cerca de 350 usinas distribuídas no país, na produção do ano-safra de 2007/08. Destas usinas, todas são auto-suficientes na cogeração de energia elétrica (UNICA, 2008).

A cana-de-açúcar é cultivada principalmente no Sudeste e no Nordeste do Brasil, onde possuem diferentes períodos de colheita: de Abril a Dezembro, na região Centro-Sul, e de Setembro a Março, na região Nordeste. Mais de 60% da cana-de-açúcar brasileira é produzida no estado de São Paulo (UNICA, 2008).

A receita anual bruta dos setores de açúcar e etanol gira em torno de US\$ 20 bilhões, sendo, em 2007/08, cerca de 54% deste valor gerado pelas vendas de etanol, 44% pela venda de açúcar e os 2% restantes pela bioeletricidade vendida no mercado interno (UNICA, 2008).

Figura 5: Produção da Região Norte/Nordeste definida a partir dos dados obtidos até 16/ago/2008

REGIÃO/ESTADO	PRODUÇÃO DE CANA (milhões de toneladas)	% DO TOTAL	PRODUÇÃO DE AÇÚCAR (milhões de toneladas)	PRODUÇÃO DE ETANOL (bilhões de litros)
<b>Sudeste</b>	<b>339,8</b>	<b>68,54%</b>	<b>21,56</b>	<b>15,49</b>
São Paulo	296,3	59,76%	19,11	13,35
Minas Gerais	35,7	7,20%	2,12	1,78
<b>Centro-Oeste</b>	<b>50,9</b>	<b>10,27%</b>	<b>2,10</b>	<b>2,98</b>
Goiás	21,1	4,26%	0,95	1,21
Mato Grosso	14,9	3,01%	0,54	0,89
Mato Grosso do Sul	14,9	3,01%	0,62	0,88
<b>Nordeste</b>	<b>63,7</b>	<b>12,85%</b>	<b>4,79</b>	<b>2,15</b>
Alagoas	29,4	5,93%	2,52	0,85
Pernambuco	19,8	3,99%	1,68	0,51
<b>Sul</b>	<b>40,5</b>	<b>8,17%</b>	<b>2,51</b>	<b>1,87</b>
Paraná	40,4	8,15%	2,51	1,86
<b>Norte</b>	<b>0,9</b>	<b>0,18%</b>	<b>0,04</b>	<b>0,04</b>
<b>TOTAL</b>	<b>495,8</b>	<b>100%</b>	<b>31,00</b>	<b>22,53</b>

Fonte: UNICA (2008)

## 2.3 O etanol

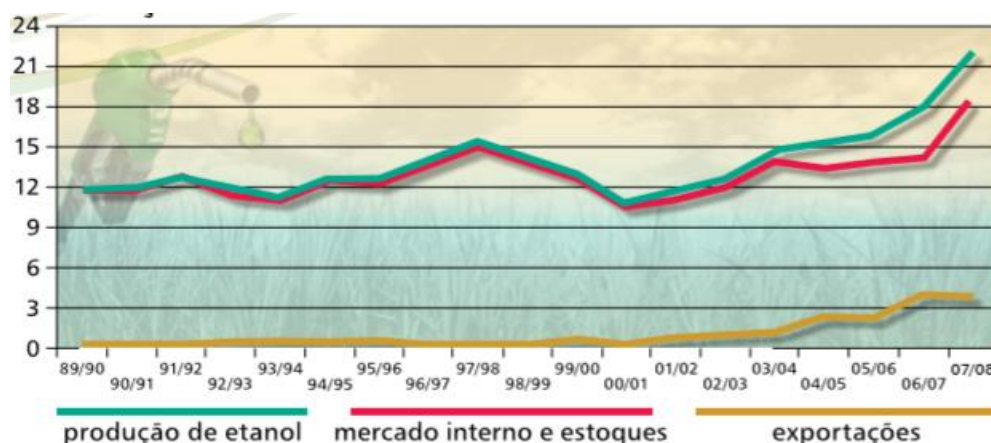
O etanol, também conhecido como álcool etílico, é produzido no Brasil quase que exclusivamente pelo processo de fermentação e destilação do caldo de cana e do melaço, resíduos provenientes da produção de açúcar. A partir de 1975 o etanol surgiu no Brasil como combustível para motores de combustão interna, sendo, em 2008, o combustível que representava mais de 50% do total de combustível consumido pelos veículos leves que circulam no país (UNICA, 2008).

O Brasil produz dois tipos de etanol, o hidratado, possuindo um teor de água de aproximadamente 5,6% em volume; e o anidro, que é virtualmente livre de água, onde, o hidratado é utilizado em veículos com motores movidos somente a etanol ou flex,fuel, e o anidro somente para misturar na gasolina antes da venda. Não só o Brasil, como vários outros países estão misturando o etanol anidro junto à gasolina para reduzir a utilização do petróleo e aumentar a octanagem, fornecendo aos motoristas um combustível com menos poluentes e mais renovável (UNICA, 2008).

O etanol foi utilizado em automóveis pela primeira vez no Brasil na década de 1920, porém a indústria ganhou um forte impulso nos anos 70, com a introdução do ProÁlcool em 1975, que foi criado para estimular o uso e a produção do etanol (UNICA, 2008).

O país teve uma ótima produção de etanol na safra de 2007/08, superando-se em 22,5 bilhões de litros, como mostra o Gráfico1, o que significa, 27% a mais em relação à safra 2006/07. Do valor de produção total, o mercado interno absorveu a maior parte dele, cerca de 84%, sendo do restante, 3,6 bilhões de litros dirigidos à exportação.

Gráfico 1: A evolução do mercado brasileiro de etanol (bilhões de litros)

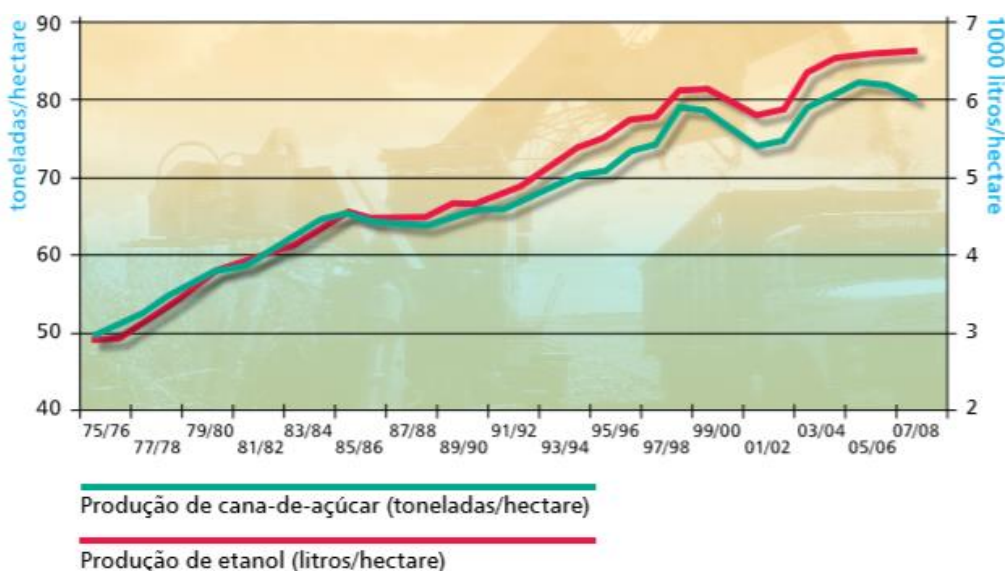


Fonte: UNICA (2008)

Cerca de 29 novas usinas começaram a produzir etanol no ano de 2008 na região Centro-Sul do país, obtendo como investimentos no setor o total de U\$S 33 bilhões até 2012. Atualmente, os investidores estrangeiros possuem 22 usinas no Brasil, porém, até 2012/13, este número deve subir para 31 unidades. No gráfico 2, pode-se observar a evolução da produtividade industrial na produção de etanol. (UNICA, 2008).

Todo este sucesso do programa de etanol no Brasil é devido a mistura obrigatória à gasolina, que a especificação permite um teor de 20 a 25% de etanol anidro, e a expansão do mercado de carros flex fuel que está cada vez mais crescente.

Gráfico 2: Evolução da produtividade agrícola e industrial na produção de etanol



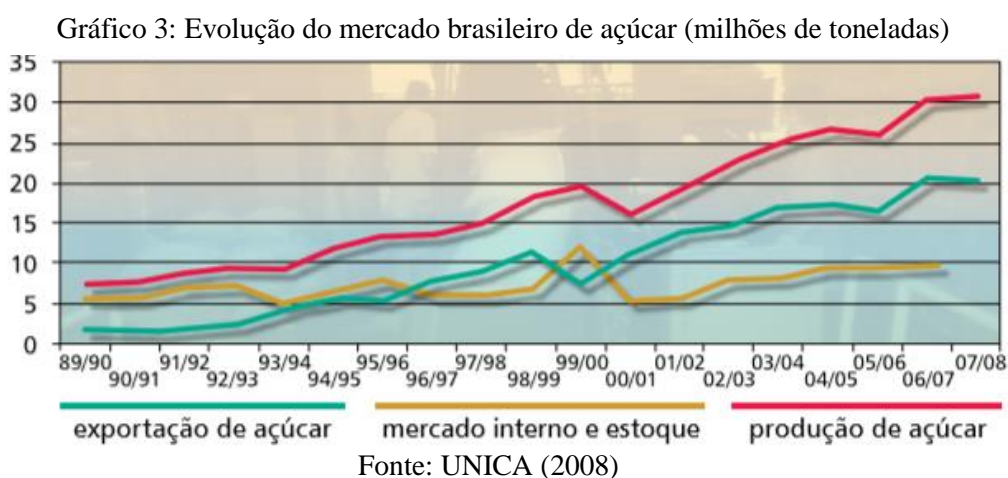
Fonte: UNICA (2008)

O etanol não se limita o uso somente para os veículos leves, estão estudando a possível possibilidade de seu uso nos transportes públicos como os ônibus, movidos atualmente por uma mistura de 95% de etanol e 5% de um aditivo que promove a ignição (E-95). Este estudo está baseado em um projeto piloto, coordenado pelo Centro Nacional de Referência em Biomassa (CENBIO), e co-patrocinado pela UNICA. O principal intuito da substituição do óleo diesel pelo etanol é o grande benefício que o meio ambiente terá, pois estima-se que a troca de mil ônibus movidos a diesel por modelos movidos a etanol reduziria as emissões de CO<sub>2</sub> em cerca de 96 mil toneladas por ano, o que são equivalentes às emissões de 18 mil automóveis movidos à gasolina. Outro fator importante que irá beneficiar, é a eliminação de emissão das partículas tóxicas que compõem a fumaça emitida pelos motores à diesel (UNICA, 2008).

## 2.4 O açúcar

O açúcar, produto resultante da cana-de-açúcar, é produzido e exportado pelo Brasil para mais de 100 países, o que faz dele o maior produtor, representando 20%, e exportador, representando 40%, de açúcar do mundo, como mostra o Gráfico 3, as evoluções de exportação e produção cresce a cada ano que se passa (UNICA, 2008).

“O Brasil é membro da Aliança Global pela Reforma e Liberação do Comércio de Açúcar, organização que defende o comércio livre e justo de açúcar” (UNICA, 2008).



## 2.5 Bioeletricidade

A bioeletricidade é um produto de extrema importância vinda do setor sucroenergético, pois pode oferecer um novo desenvolvimento tecnológico, incluindo renda, aprimorando a competitividade do açúcar e do etanol, que conseqüentemente, promove o crescimento do mercado (UNICA, 2008).

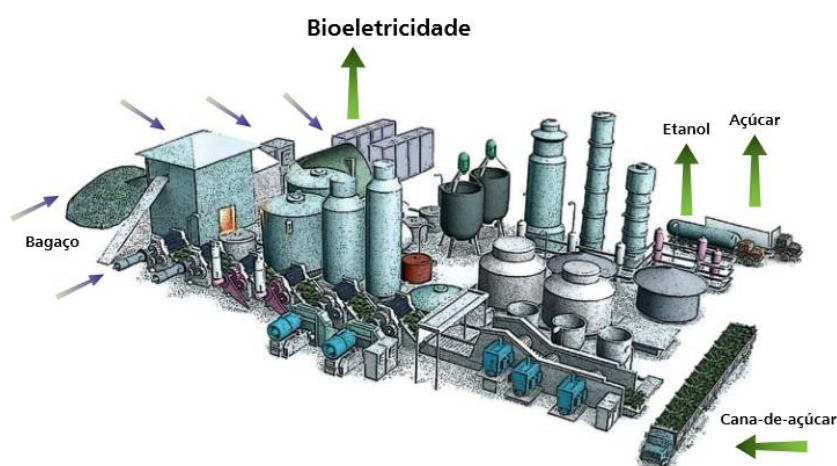
É importante ressaltar que todas as usinas e destilarias do país são autossuficientes em cogeração de energia elétrica somente através da queima do bagaço da cana-de-açúcar, porém, será possível produzir muito mais energia, fazendo com o excedente gerado possa ser comercializado no mercado, se junto ao bagaço, queimar a palha da cana-de-açúcar em caldeiras de alta eficiência, pois assim, de todo potencial energético teórico existente na cana, dois terços que representam o bagaço e a palha da cana-de-açúcar, começam a ser aproveitados totalmente (UNICA, 2008).

A cana-de-açúcar obtém de grosso modo a composição energética primária dividida nas seguintes partes: um terço no caldo da cana, um terço no bagaço e um terço na palha, sendo, o caldo utilizado para produzir açúcar e etanol, e o bagaço é queimado para gerar vapor e bioeletricidade em um processo de baixa eficiência energética. Já a palha da cana-de-açúcar é queimada nos canaviais para facilitar a colheita manual, o que faz desperdiçar o potencial energético primário contido nela, porém, com a lei da queima da cana-de-açúcar originada de 2002, a expansão da colheita mecanizada cresceu rapidamente, gerando ganhos expressivos de eficiência e conseqüentemente eliminando a necessidade de queimar o canavial, o que possibilita o aproveitamento da palha para a geração de bioeletricidade (UNICA, 2008).

As usinas sucroalcooleiras do país apresentavam no início de 2008 um potencial médio de geração excedente de energia elétrica equivalente a 1.800 Megawatts Médios (MWm), correspondente apenas a 3% das necessidades do Brasil. Aumentando o uso da biomassa da cana-de-açúcar e com a implementação de caldeiras de alta eficiência, estimativas dizem que até 2015 este valor da geração poderia aumentar para até 11.500 MW médios, ou seja, 15% da demanda de energia elétrica do Brasil (UNICA, 2008).

A energia elétrica proveniente da cana-de-açúcar é uma opção especialmente interessante para o Brasil, pois a maior parte da eletricidade do país é resultante de grandes usinas hidrelétricas. O período de colheita da cana-de-açúcar coincide com a época de seca no país, ou seja, quando as usinas hidrelétricas diminuem sua produção devido à redução nos níveis de seus reservatórios. Isso significa que existe uma complementaridade entre estas duas fontes de eletricidade (UNICA, 2008). A Figura 6 mostra como é o setor sucroenergético resumidamente.

Figura 6: Setor Sucroenergético



Fonte: UNICA (2008)

## **2.6 A cogeração de energia elétrica**

Uma fábrica de açúcar de cana é auto-suficiente em energia. Obtém a potência e calor necessários pela queima de seu próprio combustível, o bagaço. Uma fábrica projetada para ser eficiente em energia e operada adequadamente produzirá excesso de bagaço, de onde se pode gerar eletricidade para venda (PAYNE,1989, p.165).

Como assunto muito presente nas discussões nos dias atuais, a cogeração de energia elétrica é um fator de extrema importância para o país, pois com o crescimento populacional e de bens que o mesmo está vivendo, exige-se alternativas de novas tecnologias em todos os campos sociais e econômicos para que se possa obter uma vida de boa qualidade (PERILLO, 2015).

Cogerar energia elétrica significa obter o processo de produção combinado entre o calor e a energia mecânica a partir de um mesmo combustível, sendo capaz de produzir benefícios sociais, econômicos e ambientais. A cogeração acontece através da queima do combustível por fornos ou caldeiras para produzir vapor. A pressão que este vapor possui faz com que gire a turbina, gerando então energia mecânica, que é enviada para o gerador, onde é gerada a energia elétrica (ANEEL apud WEG, 2015).

## **2.7 Biomassa como combustíveis para caldeiras**

Para cogerar energia elétrica poder ser utilizado vários tipos de combustíveis, porém, neste trabalho, será abordado apenas a utilização das biomassas: bagaço da cana-de-açúcar e a palha da cana-de-açúcar, pois é um tipo de combustível que não agride o meio ambiente e possui benefícios econômicos de grande representatividade no território brasileiro.

### **2.7.1 Biomassa**

Biomassa é todo recurso renovável proveniente da matéria orgânica, podendo ser de origem vegetal ou animal, havendo a cogeração de energia elétrica como objetivo principal. A biomassa é uma forma de aproveitar a luz solar indiretamente, havendo a conversão da radiação solar em energia química, por meio da fotossíntese (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2015). Com o clima tropical e chuvoso de algumas regiões do Brasil, várias localidades podem oferecer ótimas condições para a produção e utilização da biomassa em

grande escala, na Figura 7 mostra os tipos de biomassas existentes em cada região do país (BIOMASSA, 2015).

Figura 7: Perfil das principais fontes alternativas de biomassa no Brasil



Fonte: Meio Ambiente (2012)

A biomassa passou a ter maior incentivo na utilização para cogeração de energia elétrica através do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), conforme descrito no decreto nº 5.025, de 2004, criado com o objetivo de expandir a participação de energia elétrica produzida através de biomassas, energia eólica e pequenas centrais hidrelétricas. A finalidade é incentivar a diversificação da Matriz Energética Brasileira, procurando alternativas para aumentar a segurança do abastecimento de energia elétrica do país, e também valorizar as características e potencialidades da região onde será aplicada (PROINFA, 2015).

Toda esta preocupação em relação a energia elétrica começou a partir de 2001, depois do apagão que aconteceu no país.

### 2.7.2 O Bagaço da cana-de-açúcar

Segundo Agrovale, o bagaço da cana-de-açúcar é um resíduo fibroso resultante da extração do caldo da cana, onde pode ser utilizado de diversas maneiras, principalmente como combustível em caldeiras para geração de energia elétrica e calor (AGROVALE, 2015).

De acordo com Hugot (1969), a propriedade mais importante do bagaço da cana-de-açúcar sob o ponto de vista de produção de vapor é a sua umidade, a moenda precisa trabalhar



controlando pontualmente a embebição, ou seja, adição de água no bagaço para obter maior extração do caldo, para que a umidade saia de acordo com os parâmetros adequados.

O bagaço possui uma densidade aparente grande, por isso torna-o uma matéria muito volumosa para se estocar, o que acaba sendo um problema para as usinas. Sem ser regiões muito secas, não é viável deixar o bagaço ao ar livre, pois o mesmo fermenta, apodrece e perde grande parte de seu valor. No entanto, se obter cuidado ao estocar, colocando-o em forma adequada, como piramidal, é possível conservá-lo ao ar livre. Para evitar montanhas enormes de bagaço, comprime-se para diminuir seu volume (HUGOT, 1969).

### 2.7.3 A palha da cana-de-açúcar

A palha é um subproduto resultante do corte mecanizado da cana-de-açúcar que fica no campo e que atualmente os investimentos para a recuperação da mesma está cada vez mais intenso, visando além de uma melhor produtividade, o aumento da quantidade de energia elétrica excedente para a comercialização, que conseqüentemente, aumenta o faturamento da usina. (JUNIOR, 2009)

Para recolher a palha do campo, existem três métodos segundo Mariani Filho (2006), sendo eles:

- **Método I**

Este método consiste em três etapas: colheita mecanizada da cana, aleiramento e enfardamento da palha.

Neste sistema, a colheita da cana-de-açúcar é mecanizada sendo levada posteriormente à indústria. A palha depois de cortada deve ficar exposta ao sol no campo, ao longo de 5 a 8 dias, até que sua umidade atinja o valor de 12 a 15%. Posteriormente, a palha é aleirada e recolhida do solo por uma enfardadeira. O aleiramento é basicamente amontoar ou empilhar a palha contida sobre o solo em leiras (tabuleiros) ou camadas contínuas, contendo um espaço entre uma e outra, dependendo da declividade do terreno, do tipo de material utilizado ou disponível e da densidade do material derrubado no solo.

O enfardamento consiste no processo de compactação da palha em grandes fardos para que possam ser manuseados com mais facilidade. Este processo possui vantagens e desvantagens, sendo elas:

**Vantagens:** a principal vantagem neste processo é o aumento considerável da densidade da palha após o enfardamento, o qual favorece o transporte para a usina.

**Desvantagens:** por possuir várias operações, aleiramento, enfardamento, depois o depósito no campo, exige de uma equipe de funcionários para recolher os fardos e colocar nos caminhões para serem levados até a usina.

- **Método II**

Este método a colheita da cana é mecanizada, porém, não separa a palha da cana. Este processo é obtido através do desligamento dos exaustores da colhedeira, que, desta forma, a palha é transportada juntamente com a cana até a indústria, local que será feita a separação da mesma em uma estação de limpeza a seco.

**Vantagens:** a principal vantagem neste processo é o aproveitamento do mesmo sistema de transporte da cana, no qual utiliza-se todo o sistema de logística que a usina possui.

**Desvantagens:** com este processo, diminui-se a densidade de carga carregada, pois a palha ocupa o espaço em que a cana poderia preencher, sendo esta mais densa, havendo então, a necessidade de redimensionamento de todo o sistema de transporte utilizado. A umidade da palha é alta, em torno de 50%, pois é enviada para a usina logo após a colheita, não havendo o tempo de permanência no campo exposta ao sol. Devido a palha ser limpa a seco na usina, há a necessidade de construir uma estação de limpeza a seco, cuja a função é de separar a palha da cana e eliminar todas a impurezas nela existente, como as pedras e a terra, além de triturar a palha para deixa-la com a granulometria semelhante a do bagaço.

- **Método III**

Este último método consiste na colheita mecanizada, separação e trituração da palha por meio de forrageira.

Este processo é realizado com os exaustores da colhedeira ligados, para que haja a separação da palha com a cana, enviando esta para a usina, e deixando a palha no campo exposta ao sol no período de 5 a 8 dias, com a finalidade de diminuir sua umidade para 12 a 15%. A palha é aleirada e recolhida por uma forrageira, o qual deposita a palha já triturada nos caminhões específicos, que a transporta até a usina.

**Vantagens:** com a palha exposta ao sol durante alguns dias, a mesma oferece condições ideais como combustível para as caldeiras, pois seu poder calorífico inferior (PCI) aumenta de 7.524 K.J/Kg com uma umidade de 50%, para 14.630 K.J/Kg, com uma umidade de 12 a 15%. Outra vantagem importante é o tritramento da palha em campo, pois a mesma chega pronta para ser utilizada nas caldeiras da usina, o que faz com que não precise instalar ou adequar novos equipamentos, o que gera mais gastos.

**Desvantagens:** a principal desvantagem que este processo apresenta é a baixa densidade que a palha possui, pois precisa de mais transporte para carregá-la, o que faz com que aumente o custo do transporte.

As Figuras 8,9, e 10 ilustram os processos citados nos itens acima:

Figura 8: Exemplo de Enfardadeira



Fonte: Luigi Mariani Filho (2006)

Figura 9: Caminhão transportando os fardos de palha



Fonte: Luigi Mariani Filho (2006)

Figura 10: Recolhimento da palha com Forrageira



Fonte: Luigi Mariani Filho (2006)

#### 2.7.4 Poder calorífico do bagaço e da palha da cana-de-açúcar

Segundo HUGOT (1969, p.953), “o poder calorífico, ou PC, é a quantidade de calor que a combustão de 1 Kg do combustível considerado pode fornecer. ”

O poder calorífico distingue-se em dois valores:

- “O Poder Calorífico Superior, ou PCS: é o calor despreendido pela combustão de 1 Kg do combustível bruto, utilizado a 0°C e sob uma pressão de mercúrio de 760 mm, sendo todos os produtos da combustão relacionados a 0°C e 760 mm.” (HUGOT, 1969, p.953,954) Em outras palavras, o poder calorífico superior é quando a água é completamente condensada.

O poder calorífico superior do bagaço é facilmente medido em um laboratório, através da bomba calorimétrica de Mahler.

- “O Poder Calorífico Inferior, ou PCI, que supõe, pelo contrário, que a água formada pela combustão, assim como a água fisiológica do combustível, continue no estado de vapor” (HUGOT, 1969, p.954).

O poder calorífico superior demonstra claramente o potencial de calor teoricamente contido no combustível, mas como na prática industrial não foi possível fazer diminuir a temperatura dos gases de combustão abaixo do ponto de condensação, o poder calorífico inferior fornece uma ideia mais exata do calor realmente obtido. Desse modo, deve-se adotar o poder calorífico inferior na prática, no entanto, como não existe instrumento que forneça o valor, este deve ser calculado (HUGOT, 1969, p.954).

A fórmula mostra como calcular o PCI do bagaço segundo HUGOT (1969, p.957):

$$PCI = 4250 - 12s - 48,5w$$

PCI = Poder Calorífico Inferior (Kcal/kg)

s = açúcar % bagaço (Pol% Bagaço);

w = umidade do bagaço = água % do bagaço.

Na tabela 2 mostram-se os valores do poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) de acordo com suas umidades:

Tabela 2: Poder calorífico da Palha e do Bagaço

	<b>PCS (Base seca) MJ/kg</b>	<b>Umidade (%)</b>	<b>PCI (Kcal/kg)</b>
<b>Palha</b>	17,0	15,0	3.100,0
<b>Palha</b>	17,0	35,0	2.250,0
<b>Bagaço</b>	18,0	50,0	1.710,0

Fonte: Adaptada Linero, 2012, slide 16, apud, Filho, 2013, p.48

Segundo Payne (1989) o bagaço estocado seco se torna um combustível mais eficiente. Porém, perde rapidamente seu conteúdo de açúcar, significando perda de energia.

## 2.8 Equipamentos utilizados na geração de energia elétrica

### 2.8.1 Caldeiras

Caldeiras são constituídas de vasos fechados submetidos à pressão, onde a água que nela contém se transforma em vapor quando atingida certa temperatura. Uma caldeira tem por finalidade gerar vapor para acionamento de equipamentos como:

- Turbinas de moenda;
- Turbo gerador de energia elétrica;
- Turbo bombas para recalque de água;
- Ventiladores/ Exaustores;
- Aquecimento da matéria prima para fabricação de açúcar e álcool.

Os combustíveis utilizados na geração de vapor são geralmente queimados diretamente na fornalha da caldeira. O princípio de combustão acontece através do ar formado de Oxigênio (O) e Nitrogênio (N) que ficam agrupados em pares. Há alguns fatores que influenciam diretamente a combustão, como, o tamanho das partículas, a umidade do mesmo, a quantidade de ar e combustível, temperatura do ar e a relação de distribuição entre ar/combustível (Treinamento Interno). O controle de combustão é de extrema importância, pois serve para evitar perdas de calor e aproveita o máximo possível do combustível, fazendo com que a caldeira tenha melhor rendimento.

Os principais combustíveis utilizados nas caldeiras são classificados em:

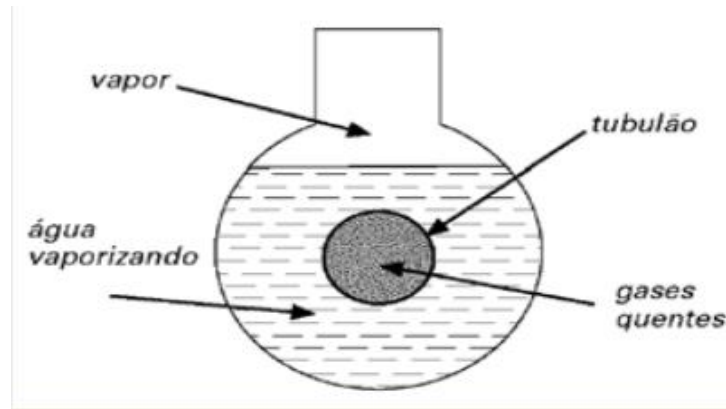
- **Sólido:** Bagaço de cana-de-açúcar, Lenha e Carvão;
- **Líquido:** Álcool e óleo;

- Gasoso: Gás

### 2.8.1.1 Tipos de caldeiras

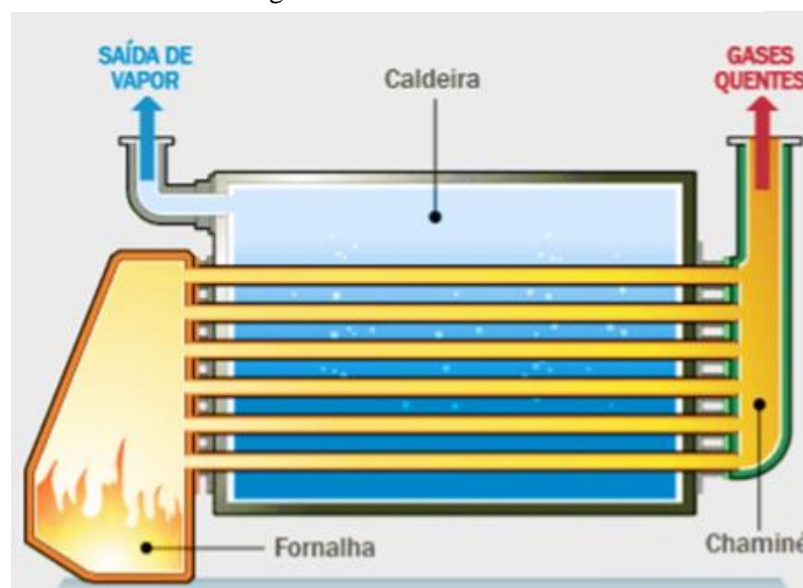
Existem dois tipos de caldeiras, as flamotubulares e as aquatubulares. As flamotubulares são caldeiras em que os gases quentes provenientes da combustão atravessam a mesma pelo interior de tubos que se circundam por água, fazendo com que ceda calor a água, como mostra a Figura 11 e 12. Este tipo de caldeira é mais utilizado para pequenas capacidades e quando se quer apenas vapor saturado de baixa pressão (LEITE; MILITÃO, 2015).

Figura 11: Representação da caldeira flamotubular



Fonte: Prof. Strobel, [s.d]

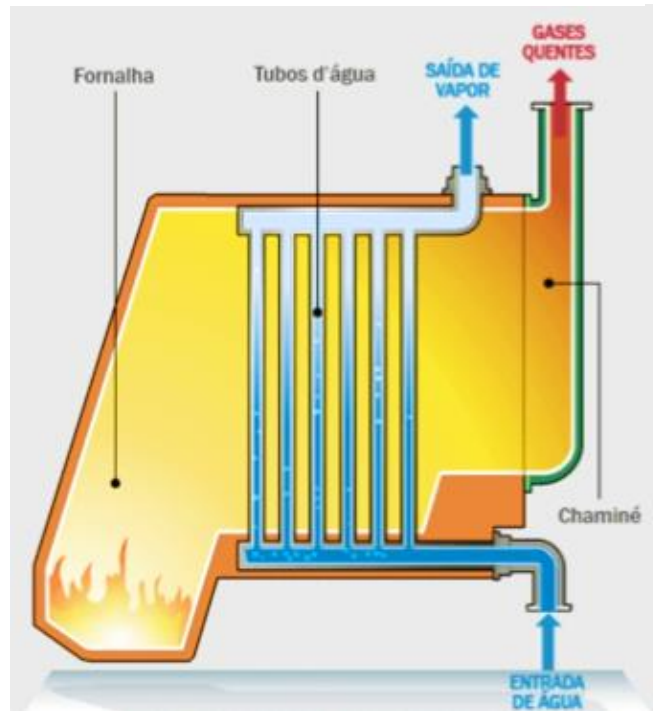
Figura 12: Caldeira Flamotubular



Fonte: Marshall Brain, [s.d]

As caldeiras aquatubulares, são aquelas que possuem a circulação de água dentro dos tubos, e os gases quentes da combustão o envolvem por fora, como mostra a Figura 13. Este tipo de caldeira é utilizado para capacidade de porte maior e para se obter vapor superaquecido.

Figura 13: Caldeira Aquatubular



Fonte: Marshall Brain, [s.d]

### 2.8.1.2 Vapor

Têm-se dois tipos de vapores, o saturado e o superaquecido.

O vapor saturado é quando a temperatura de saturação é atingida e a água passa a se transformar em vapor, mantendo a temperatura constante. Se o vapor estiver totalmente isento de água, é chamado vapor saturado seco, havendo qualquer quantidade de água presente, é chamado de vapor saturado úmido.

Vapor superaquecido é aquele que mesmo após a água ter se transformado em vapor o sistema continua recebendo calor, fazendo com que aumente sua temperatura, ou seja, fica com a temperatura acima da temperatura de saturação.

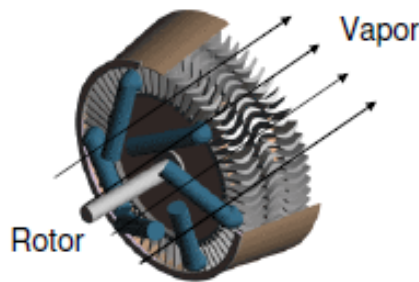
### 2.8.1.3 Turbinas a vapor

Turbina a vapor é definida como uma máquina térmica onde a energia potencial termodinâmica contida no vapor é convertida em trabalho mecânico.

Sendo assim, as turbinas a vapor são máquinas de combustão externa, ou seja, os gases resultantes da queima do combustível utilizado na caldeira não entram em contato com o fluido de trabalho que percorre no interior da máquina e realiza os processos de conversão da energia do combustível em potência de eixo (ANDRADE, 2015).

O vapor gerado na caldeira passa pela turbina onde gera forças, que aplicadas às pás, determinam um momento motor resultante, onde faz girar o rotor, como pode-se observar na Figura 14 (ANDRADE, 2015)

Figura 14: Passagem de Vapor pela Turbina



Fonte: Alan Sulato de Andrade, [s.d]

As turbinas a vapor são utilizadas nas indústrias para acionar geradores elétricos, propulsão, compressores, turbo bombas, sopradores entre outras aplicações.

Existem dois tipos de turbinas a vapor, as de ação e as de reação. As de ação “giram sob a ação da velocidade imprimida ao vapor pela queda de pressão” (HUGOT, 1969, p.1069). Neste tipo de turbina, o vapor se expande somente nos órgãos fixos, que são as pás diretrizes e bocais, e não nos órgãos móveis, que são as pás do rotor, sendo assim, a mesma pressão dos dois lados do rotor.

Já as turbinas de reação, o vapor se expande parte nas pás móveis e parte nas pás fixas, sendo assim, a pressão de vapor na entrada do rotor é maior do que na saída do mesmo (HUGOT, 1969, p.1078).



#### **2.8.1.4 Gerador elétrico**

O gerador elétrico é utilizado para converter a energia mecânica gerada pela turbina em energia elétrica.

O modelo mais simples de um gerador elétrico é formado por uma espira plana na qual tem liberdade para se mover sob a ação de um campo magnético uniforme. Esta espira gira em torno de um eixo perpendicular em direção das linhas de força do campo magnético aplicado. A variação do valor do fluxo que atravessa a espira móvel induz nela uma força eletromotriz (COPEL, 2014).

## 3 ESTUDO DE CASO: LEVANTAMENTO DE DADOS

### 3.1 Empresa

A empresa em que está sendo estudada está localizada na região de Ourinhos SP, possuindo aproximadamente 1.000 funcionários onde se dividem em três turnos de trabalho. A mesma possui a capacidade de moagem de 16.600 Ton/dia, produção de açúcar de 35.000 Ton/dia, de etanol 350 m<sup>3</sup>/dia e cogeração de energia elétrica de aproximadamente 1.500 KWh/dia.

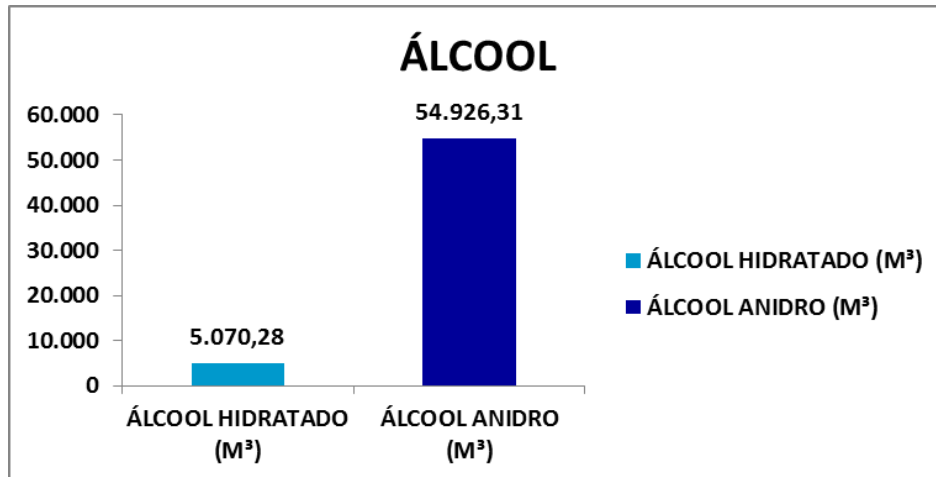
Na empresa são produzidos o etanol hidratado e o etanol anidro, tendo como principal diferença a graduação alcoólica, ou seja, concentração de etanol. O etanol hidratado deve apresentar teor alcoólico na faixa de 95,1 a 96,0 % (volume/volume) enquanto o etanol anidro deve apresentar teor alcoólico de no mínimo 99,6 % (volume/volume).

O açúcar produzido na unidade é do tipo VHP (*Very High Polarization*) e VHP Plus (*Very High Polarization Plus*), onde são carregados em bags e a granel. Os carregados em bags são exportados para o Uruguai, com o peso de 1.000 Kg cada bag, e os a granel são distribuídos em algumas cidades do país. O açúcar VHP recebe essa nomeação devido à abreviação de *Very High Polarization* (alta taxa de polarização), essa variação, por ter menos umidade, é ideal para exportação, pois facilita o transporte e a armazenagem. Sua produção é destinada ao mercado externo para o refino em outros países. O VHP Plus significa *Very High Polarization Plus* (taxa muito alta de polarização), é a variação intermediária do granel.

Da energia gerada na unidade, parte é vendida, parte é utilizada internamente. A mesma é gerada em 13,8 mil Volts seguindo para a subestação onde eleva a tensão elétrica para 88 mil Volts, essa energia saindo da subestação, é transportada para a linha de transmissão chamada CTEEP (Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista), onde é distribuída para duas cidades. A CTEEP (Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista) somente verifica onde precisa de maior ou menor quantidade de energia, quem faz a distribuição da energia elétrica para as cidades, é a CPFL (Companhia Paulista de Força e Luz). A energia é vendida para o leilão na câmara de comércio de energia elétrica.

O Gráfico 4 apresenta o mix de produção de Etanol hidratado e Etanol anidro realizado na usina, na safra 2014/2015.

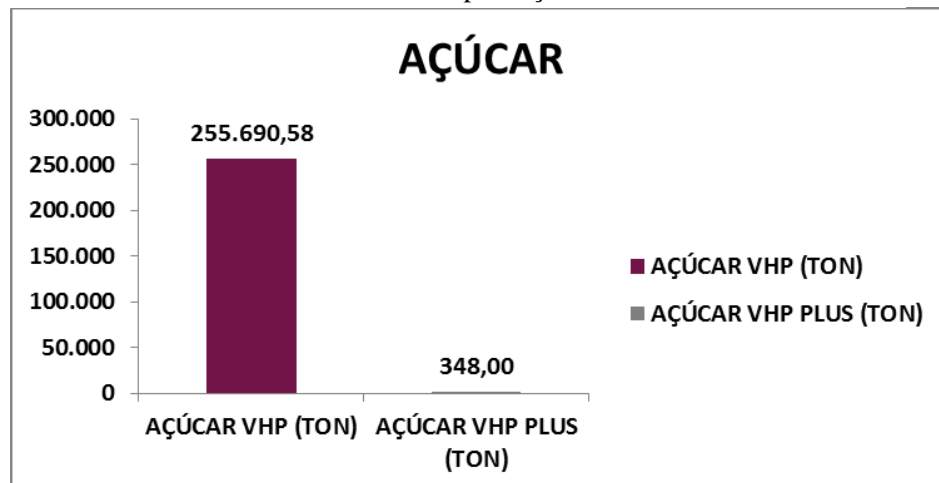
Gráfico 4: Mix de produção safra 2014/2015



Fonte: Própria Empresa

O Gráfico 5 apresenta o mix de produção de Açúcar VHP e VHP Plus realizado na usina, na safra 2014/2015.

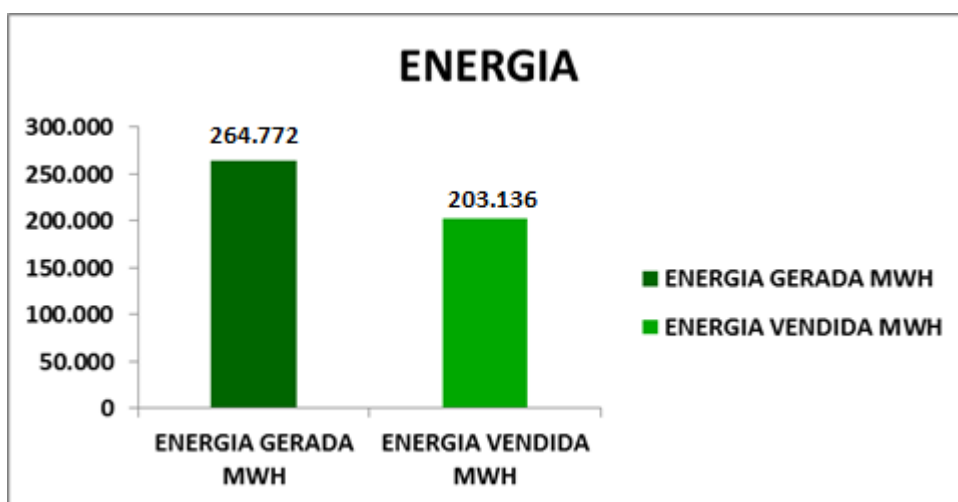
Gráfico 5: Mix de produção safra 2014/2015



Fonte: Própria Empresa

O Gráfico 6 apresenta a produção Energia realizada na usina, na safra 2014/2015.

Gráfico 6: Energia Gerada e Vendida na safra 2014/2015



Fonte: Própria Empresa

Hoje em dia em uma usina que produz açúcar, álcool e cogera energia elétrica, um fator de muita importância dentre os três é a cogeração, pois é um produto que além de suprir a própria necessidade energética, possui alto rendimento para a empresa na exportação (venda) da mesma.

Na empresa em que está sendo realizado o estudo, a cada safra que se passa maior é a meta de exportação de energia elétrica, o que resulta na compra de grande quantidade de biomassa, pois somente o bagaço que é extraído na moenda da própria cana não supre a necessidade para atingir a meta estabelecida.

Com a compra desta biomassa, sendo ela, bagaço de cana-de-açúcar, não se obtém lucro quanto se utilizar de seu próprio subproduto para cogerar, pois é um subproduto de alto valor. Sendo assim, visando maior produção e economia, utiliza-se a palha da cana-de-açúcar, trazendo benéficos tanto para a cogeração de energia elétrica, quanto para o solo onde é plantado a própria cana, pois se ficar grande quantidade de palha depositada no solo, o mesmo fica úmido por mais tempo, o que favorece o desenvolvimento dos insetos, como a cigarrinha, uma praga perigosa para a cana-de-açúcar.

A palha da cana-de-açúcar é um subproduto que possui alto valor energético, o que resulta em um melhor rendimento na cogeração de energia elétrica, e, sendo comparada em valor energético com o bagaço, a palha fica mais barata que a compra do mesmo.

Para realizar a cogeração de grande porte, é utilizada a caldeira aquatubular de um único tubulão, onde se utiliza vapor superaquecido.

A usina em questão possui duas caldeiras, sendo, uma chamada de caldeira A e outra de caldeira B.

A caldeira A foi fabricada no ano de 2010, possuindo a capacidade de produção de vapor máxima de 175.000 Kg/h, pressão de trabalho de 100,0 kgf/cm<sup>2</sup> e uma temperatura de vapor de 530°C. Esta caldeira possui as especificações mostradas na Tabela 3.

Tabela 3: Especificações Caldeira A

Tipo	Aquatubular "MONODRUM"
Modelo	AMD-75-7GI
Pressão de projeto	120,0 kg/cm <sup>2</sup>
Temp. da água de alimentação	115°C
Temperatura de ar local	25°C
Sistema de tiragem	Induzida
Número de seções de grelha	07
Tipo de grelha	Inclinada fixa
Combustível	Bagaço de cana com 52% de H <sub>2</sub> O

Fonte: Própria Empresa

A caldeira B foi fabricada no ano de 2011, possuindo uma capacidade de produção de vapor máxima de 225.000 kg/h, pressão de trabalho de 100,0 kgf/cm<sup>2</sup> e uma temperatura de vapor de 530°C. Esta caldeira possui as especificações mostradas na Tabela 4.

Tabela 4: Especificações Caldeira B

Tipo	Aquatubular "MONODRUM"
Modelo	AMD-58-6GI
Pressão de projeto	120,0 kg/cm <sup>2</sup>
Temp. da água de alimentação	115°C
Temperatura de ar local	25°C
Sistema de tiragem	Induzida
Número de seções de grelha	06
Tipo de grelha	Inclinada fixa
Combustível	Bagaço de cana com 52% de H <sub>2</sub> O

Fonte: Própria Empresa

O vapor gerado sai das turbinas com 21 kg a 330°C e 1,5 kg de 128 a 130°C, sendo, 21 kg distribuídos para as turbinas da moenda e resfriadeira, e 1,5 kg distribuídos para destilaria e fabricação de açúcar.

Em relação à palha, o método de enfardamento da mesma utilizado na unidade é o método I e II, citado na revisão teórica, onde, consiste em deixar a palha da cana exposta ao sol no campo durante 5 a 8 dias para que a mesma atinja a umidade adequada de até 15%. Posteriormente, a palha é aleirada (amontoada), recolhida do solo por uma enfardadeira, que por sua vez enfarda a palha deixando-a em cubos e carregada em um caminhão para ser levada até o depósito na indústria, como mostra a Figura 15 e 16.

Figura 15: Processo de Aleiramento, Enfardamento, Carregamento, Recolhimento e Transporte da Palha



Fonte: Própria Empresa

Figura 16: Depósito de Palha Enfardada



Fonte: Própria Empresa

Para a palha ser queimada na caldeira, ela precisa ser triturada primeiro, pois vem do campo inteira. Então, ela é levada até o local onde fica o triturador, para ser triturada e colocada na caldeira para queimar juntamente ao bagaço, como mostra a Figura 17 e 18.

Figura 17: Triturador de Palha



Fonte: Própria Empresa

Figura 18: Triturador de Palha em Funcionamento



Fonte: Própria Empresa

### 3.2 Metas e realizado safra 14'15

Todo início de safra é realizado um planejamento no qual são elaboradas todas as metas para as produções do decorrer da safra. Na Tabela 5 estão as metas e o realizado na safra 14/15.

Tabela 5: Meta e Realizado Safra

<b>Safra 14'15</b>	<b>Meta</b>	<b>Realizado</b>
Moagem (Ton)	2.864.382	2.761.514
Período Safra	Abril/Dez	Abril/Dez
Geração Energia Elétrica (MWh)	229.922	264.772
Consumo Próprio (MWh)	57.288	63.038
Exportação (MWh)	198.607	203.136
Energia Adquirida (MWh)	-	1.402,1

Fonte: Própria Empresa

De toda cana moída durante a safra, foi gerado uma determinada quantidade de bagaço conforme mostra na Tabela 6. Mostra também a quantidade que havia estocado no início da safra, o que foi consumido e comprado.

Tabela 6: Geração e Consumo de Bagaço

<b>Safra 14'15</b>	
Bagaço Gerado (Ton)	773.600
Bagaço Consumido (Ton)	841.378
Bagaço Comprado (Ton)	47.650
Bagaço Estocado (Ton)	20.128
Palha Triturada (Ton)	41.167

Fonte: Própria Empresa

Nota-se que a quantidade de bagaço consumido é maior que a quantidade de bagaço gerado, isso ocorre devido à compra de bagaço de outras usinas. Realizando esta compra, significa que a energia cogenerada terá um aumento. Na safra 14/15, foi comprada a quantidade de 47.650 toneladas de bagaço, como mostrada na Tabela 7, equivalente a R\$ 4.504.354,50.



Tabela 7: Custo Bagaço Comprado

<b>Bagaço Comprado</b>		
<b>Quantidade</b>	<b>R\$/Ton</b>	<b>Total</b>
47.650	94,53	4.504.354,50

Fonte: Própria Empresa

Para a usina não comprar mais bagaço, a mesma precisa incrementar maior quantidade de palha da cana-de-açúcar para cogerar energia elétrica. Pois mesmo com os gastos de preparo, como mostra a Tabela 8, comparando em valor energético, fica mais barata do que comprar o bagaço, pois, a palha possui um PCI melhor que o mesmo, o que faz obter melhor rendimento e economia.

Na safra 14/15, foi enfardada a quantidade de 41.167,50 toneladas de palha de cana-de-açúcar, que são equivalentes a R\$ 4.041.825,15.

Tabela 8: Custo Palha

<b>Descrição das Operações</b>	<b>Quantidade (Ton)</b>	<b>R\$/Ton</b>	<b>Custo Total</b>
Enfardamento	41.167,50	54,62	2.248.568,85
Transporte	41.167,50	22,43	923.387,03
<b>Total Agrícola</b>		<b>77,05</b>	<b>3.171.955,88</b>
Recolhimento/Processamento	41.167,50	21,13	869.869,28
<b>Total Indústria + Agrícola</b>	41.167,50	<b>98,18</b>	<b>4.041.825,15</b>

Fonte: Própria Empresa

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Cálculos PCI do bagaço e da palha da cana-de-açúcar

Considerando o bagaço utilizado na unidade com 50% de umidade e pol de 1,63, segue abaixo o cálculo do PCI (Kcal/kg):

$$\begin{aligned}
 PCI &= 4.250 - 12s - 48,5w \\
 PCI &= 4.250 - (12 * 1,63) - (48,5 * 50) \\
 PCI &= 1.805,44 \text{ kcal/kg}
 \end{aligned}$$

Onde: S= Pol % Bagaço;

W= Umidade Bagaço

Considerando a palha utilizada na unidade com 18,85% de umidade, 0 % de açúcar e 10% de impureza, segue abaixo o cálculo do PCI (Kcal/kg):

$$\begin{aligned}
 PCI &= 4.250 - 12s - 48,5w \\
 PCI &= 4.250 - (12 * 0) - (48,5 * 18,85) - 10\% \\
 PCI &= 3.002,20 \text{ Kcal/kg}
 \end{aligned}$$

Onde: S= Pol % Palha;

W= Umidade Palha

Depois de ter calculado os PCI's das duas biomassas, calcula-se a quantidade de bagaço equivalente, ou seja, a quantidade de bagaço necessário para equivaler ao valor energético de uma tonelada de palha:

$$\begin{aligned}
 \text{Bagaço Equivalente} &= \frac{3.002,20}{1.805,44} \\
 \text{Bagaço Equivalente} &= 1,66
 \end{aligned}$$

De acordo com o resultado obtido, para obter a quantidade energética de uma tonelada de palha, necessita de 1,66 toneladas de bagaço.

### 4.3 Análise econômica

O intuito dos cálculos a serem realizados é demonstrar o quão vantajoso é a utilização da palha da cana-de-açúcar na cogeração de energia elétrica em substituição do bagaço comprado.

Para isso realizaremos os cálculos para chegar ao resultado de energia gerada com uma tonelada de bagaço, tendo a quantidade equivalente de palha para geração da mesma quantidade de energia.

$$\text{Bagaço} \times \text{Coeficiente de vapor equivalente} = \text{Qnt Vapor}$$

$$1 \text{ Ton} \times 2,11 = 2.110 \text{ Ton}$$

$$\frac{\text{Qnt Vapor}}{\text{Consumo Gerador}} = \text{Energia Elétrica Gerada}$$

$$\frac{2.110}{6,45} = 327,13 \text{ MWh}$$

Sabendo que uma tonelada de bagaço gera 327,13 MWh de energia elétrica, ao custo de R\$ 94,53, para produzir a mesma quantidade de energia utilizando a palha, sabendo que o poder calorífico da mesma é 66% superior ao do bagaço, conclui-se que a quantidade de palha a ser utilizada será de 602,40 Kg, como pode-se comprovar nos seguintes cálculos:

$$\frac{1 \text{ Ton de Bagaço}}{166\%} = 602,40 \text{ Kg de Palha}$$

Conhecendo o valor de processamento e uso de uma tonelada de palha que é igual a R\$ 98,18, pode-se então chegar ao valor equivalente ao uso de 602,40 Kg de palha, para gerar 327,13 MWh de energia. Comprovando a economia do uso da palha para cogeração de energia elétrica.

$$1 \text{ Ton Palha} - \text{R\$ } 98,18$$

$$602,4 \text{ Kg Palha} - X$$

$$X = \text{R\$ } 59,14$$

A justificativa do uso da palha em substituição do bagaço pode ser comprovada através dos cálculos onde apresentou uma economia de R\$ 35,39 para a geração da mesma quantidade de energia elétrica.

Analisando os dados obtidos na empresa em questão, constatou-se que na safra 14/15 foram necessários a compra de 47.650,00 toneladas de bagaço para alcançar a meta estabelecida de geração de energia elétrica, o que resultou em um custo de R\$ 4.504.354,50. Comprova-se que na substituição do bagaço pela palha a empresa economizaria um montante de R\$ 1.686.333,50.

## 5 CONCLUSÃO

A elaboração desse trabalho foi incentivada devido à necessidade da busca de fontes de energia alternativas nos dias atuais, onde nossa principal matriz energética ainda é a que se utiliza de fontes hídricas. Neste contexto as usinas sucroalcooleiras desenvolveram a sua própria maneira de cogeração de energia, sendo esta através da queima de seu subproduto, usualmente, o bagaço da cana-de-açúcar.

Com o passar do tempo, esta nova solução deixou de ser uma alternativa e se mostrou uma fonte inteiramente lucrativa, o que levou as usinas a aumentar o investimento para suprir as metas estabelecidas para cogeração de energia elétrica. Neste ponto, o subproduto gerado já não era suficiente para suprir a alta demanda, o que gerou a necessidade de comprar o mesmo de outras empresas, aumento assim o custo da cogeração.

O intuito principal deste trabalho é demonstrar através de uma análise quantitativa e estudo das propriedades das biomassas, que existe uma oportunidade de aumentar a utilização de um subproduto gerado pela própria empresa, em substituição a matéria prima comprada de terceiros e desta forma alcançar um significativo ganho econômico, neste contexto a solução encontrada foi o processamento e utilização de um maior volume de palha de cana-de-açúcar, proveniente da colheita mecanizada.

A utilização da palha juntamente com bagaço para cogeração de energia elétrica, além de ser uma solução economicamente viável, traz benefícios consideráveis ao setor agrícola, pois o acúmulo da palha no campo impede a evaporação da água tornando o solo mais úmido, o que propicia a proliferação de pragas que afetam o desenvolvimento da cana-de-açúcar.

Outro fator comprovado neste trabalho foi a real superioridade energética oferecida pela palha em relação ao bagaço; através de cálculos pode-se evidenciar que a palha apresenta uma capacidade enérgica, que é 66% (sessenta e seis por cento) superior a capacidade enérgica do bagaço, o que resulta na diminuição de 40% (quarenta por cento) no seu volume total, para produção da mesma quantidade de energia gerada pela queima do bagaço. Esta possível diminuição de volume gera uma economia de aproximadamente 38% (trinta e oito por cento) em relação ao custo da compra de bagaço.

Analisando os custos de obtenção e compra de cada um dos subprodutos e efetuando uma pesquisa detalhada dos dados obtidos na safra 14/15 na empresa em questão, constatou a necessidade de compra de 47.650,00 toneladas de bagaço, para suprir a alta demanda estabelecida para cogeração de energia elétrica no período analisado, com isso a empresa foi levada a investir R\$ 4.504.354,50 na compra deste subproduto. Com a substituição deste

montante pela palha gerada e processada pela própria empresa, concluo que obteve uma economia final R\$ 1.686.333,50 na cogeração de energia elétrica na safra 14/15, sem que houvesse algum investimento e perda da capacidade.

Com a realização desse trabalho concluo que a utilização da palha de cana-de-açúcar para cogeração de energia elétrica nas usinas sucroalcooleiras apresenta-se como uma ótima alternativa, comprovada por este trabalho de dissertação, pois além de apresentar diversos benefícios, é uma solução economicamente viável.

## REFERÊNCIAS

A Indústria Da Cana-De-Açúcar: Etanol, Açúcar e Bioeletricidade. São Paulo: Unica, 23 abr. 2015.

AGROVALE. **Bagaçõ De Cana.** Disponível em: <[http://www.agrovale.com/?sessao=bagaco\\_de\\_cana](http://www.agrovale.com/?sessao=bagaco_de_cana)>. Acesso em: 12 maio 2015.

ANDRADE JÚNIOR, Aderson Soares de; ALCARDE, André Ricardo; RAMOS, Nilza Patrícia (Ed.). **Queima: Cana-de-açúcar.** 2015. Disponível em: <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01\\_92\\_22122006154841.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_92_22122006154841.html)>. Acesso em: 26 fev. 2015.

ANDRADE, Alan Sulato de. **Máquinas Térmicas.** [s.i]: -, 2015. Acesso em: 07 de Setembro, 2015.

ANDRADE, M.sc. Alan Sulato de. **Máquinas Térmicas.** [s.i], 2015. Disponível em: <<http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasalan/AT056-Aula09.pdf>>. Acesso em: 12 ago. 2015.

BRAIN, Marshall. **CALDEIRAS.** Disponível em: <<http://ciencia.hsw.uol.com.br/motor-a-vapor2.htm>>. Acesso em: 15 jul. 2015.

BRASIL (Estado). Constituição (2002). Lei Estadual nº 11.241, de 19 de janeiro de 2002. **Eliminação Gradativa da Queima da Palha da Cana-de-açúcar e Das Providências Correlatas:** LEI ESTADUAL. Disponível em: <[http://www.iea.sp.gov.br/out/bioenergia/legislacao/2002\\_Lei\\_Est\\_11241.pdf](http://www.iea.sp.gov.br/out/bioenergia/legislacao/2002_Lei_Est_11241.pdf)>. Acesso em: 26 fev. 2015.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Biomassa.** 2009. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/biomassa>>. Acesso em: 14 abr. 2015.

Comerc Energia. **PANORAMA COMERC.** Disponível em: <<http://www.comerc.com.br/panorama.asp>>. Acesso em: 12 out. 2015.

COPEL. **Gerador Elétrico.** 2014. Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=/hpcopel/root/pagcopel2.nsf/docs/40A0E2ABD99123CF0325740C00496689>>. Acesso em: 15 ago. 2015.

DEFILIPPI FILHO, Luiz Cunali. **Estudo De Viabilidade Do Uso Do Palhão Para Geração De Energia Na Entressafra De Uma Usina Sucroenergética.** 2013. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agroenergia, Fundação Getúlio Vargas – Eesp – Fgv, São Paulo, 2013.

FERNANDO, Usina São. **Processo Industrial.** 2015. Disponível em: <[http://www.usinasaofernando.com.br/conteudo\\_site.asp?tipoID=2](http://www.usinasaofernando.com.br/conteudo_site.asp?tipoID=2)>. Acesso em: 24 abr. 2015.

FILHO, Luigi Mariani. Utilização da Palha de cana-de-açúcar para aumento da capacidade energética de plantas de utilidades. 2006. 46 f. Dissertação (Graduação em Engenharia

Mecânica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006. Acesso em: 24 de Julho, 2015.

FILHO, Paulo Lucas Dantas. **Análise de Custos na Geração de Energia com Bagaço de Cana-de-Açúcar: Um estudo de caso em Quatro Usinas de São Paulo.** 2009. 131 f. Dissertação (Pós Graduação em Energia) – Universidade de São Paulo, 2009. Acesso em: 22 Julho de 2015.

HUGOT, Emile. **Manual da Engenharia Açucareira - Vol II.** São Paulo: Mestre Jou, 1969.  
LEITE, Nilson Ribeiro; MILITÃO, Renato de Abreu. **TIPOS E APLICAÇÕES DE CALDEIRAS.** Disponível em: <[https://lcsimei.files.wordpress.com/2012/09/caldeiras\\_prominp.pdf](https://lcsimei.files.wordpress.com/2012/09/caldeiras_prominp.pdf)>. Acesso em: 15 jul. 2015.

LOBO, Camila da Silva. **A Importância da Cogeração Utilizando Bagaço de Cana-de-açúcar como forma de diversificação da matriz Elétrica.** 2013. 102 f. Dissertação ( Obtenção de grau em Engenheiro Elétrico) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013. Acesso em: 24 Julho ,2015.

MARIANI FILHO, Luigi. **Utilização Da Palha De Cana-De-Açúcar Para Aumento Da Capacidade Energética De Plantas De Utilidades.** 2006. 46 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Acesso em: 08 de Agosto, 2015.

Ministério de Minas e Energia. **O PROINFA.** Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/>>. Acesso em: 12 maio 2015.

NASTARI, Plinio M.. **Produção Sustentável: A Importância Do Setor Sucreenergético No Brasil.** 2012. Disponível em: <[http://www.agroanalysis.com.br/materia\\_detalhe.php?idMateria=1232](http://www.agroanalysis.com.br/materia_detalhe.php?idMateria=1232)>. Acesso em: 24 abr. 2015.

Nova Cana. **A cana-de-açúcar como fonte de energia elétrica.** 2015. Disponível em: <<http://www.novacana.com/estudos/a-cana-de-acucar-como-fonte-de-energia-eletrica-241013/>>. Acesso em: 24 maio 2015.

Nova Cana. **A produção de cana-de-açúcar no Brasil (e no mundo).** Disponível em: <<http://www.novacana.com/cana/producao-cana-de-acucar-brasil-e-mundo/>>. Acesso em: 24 abr. 2015.

Nova Cana. **Como é feito o processamento da cana-de-açúcar nas usinas.** 2015. Disponível em: <<http://www.novacana.com/usina/como-e-feito-processamento-cana-de-acucar/>>. Acesso em: 08 maio 2015.

O PROINFA. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/>>. Acesso em: 12 maio 2015.

OPINIÕES: **O mundo precisa de combustíveis melhores.** Ribeirão Preto: Wds Ltda e Veda Brasil Ltda, v. 43, 12 abr. 2015.



PAYNE, John Howard (Ed.). **Operações Unitárias na Produção de Açúcar de Cana**. 2. ed. São Paulo: Nobel / Stab, 1989.

Perfil das Principais Fontes Alternativas de Biomassa do Brasil. 2012. Disponível em: <<https://brasilbrasileiro1001.wordpress.com/category/regiao-centro-oeste/>>. Acesso em: 24 maio 2015.

ROMÃO JÚNIOR, Ricardo Agudo. **Análise da Viabilidade do Aproveitamento da Palha da Cana de Açúcar para Cogeração de Energia numa Usina Sucroalcooleira**. 2009. 165 f. Dissertação (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Unesp, Ilha Solteira Sp, 2009. Acesso em: 28 de Julho, 2015.

ROSSETTO, Raffaella. Queima. Disponível em: <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-açúcar/arvore/CONTAG01\\_92\\_22122006154841.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-açúcar/arvore/CONTAG01_92_22122006154841.html)> . Acesso em: 26 Fev. 2015.

SÃO PAULO. Lei n.11.241, de 19 de Setembro de 2002. Dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar e dá providências correlatas. Disponível em: <[http://www.iea.sp.gov.br/out/bioenergia/legislacao/2002\\_Lei\\_Est\\_11241.pdf](http://www.iea.sp.gov.br/out/bioenergia/legislacao/2002_Lei_Est_11241.pdf)>. Acesso em: 26 Fev. 2015.

SILVA, Edna Lúcia; MENEZES, Estera Muskat. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. 4. ed. rev. Atual. Florianópolis: UFSC, 2005. Disponível em: <[https://projetos.inf.ufsc.br/arquivos/Metodologia\\_de\\_pesquisa\\_e\\_elaboracao\\_de\\_teses\\_e\\_dissertacoes\\_4ed.pdf](https://projetos.inf.ufsc.br/arquivos/Metodologia_de_pesquisa_e_elaboracao_de_teses_e_dissertacoes_4ed.pdf)>. Acesso em: 15 mar. 2015.

SOUZA, Zilmar José de. **A co-geração de energia no setor sucroalcooleiro: desenvolvimento e situação atual**. 2002. Disponível em: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022002000100001&script=sci\\_arttext](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022002000100001&script=sci_arttext)>. Acesso em: 24 abr. 2015.

STROBEL, Dr. Eng. Prof. **CALDEIRAS: [s.i]**, 2015. Disponível em: <[ftp://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EngMec\\_NOTURNO/TM364/Material de Aula/Aula de caldeiras.pdf](ftp://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EngMec_NOTURNO/TM364/Material%20de%20Aula/Aula%20de%20caldeiras.pdf)>. Acesso em: 12 ago. 2015.

Sustentabilidade. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/sustentabilidade/>>. Acesso em: 02 Março 2015.

UNICA - União Da Indústria De Cana-De-Açúcar. **A Sustentabilidade No Setor Sucroenergético Brasileiro**. 2015. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/sustentabilidade/>>. Acesso em: 02 mar. 2015.

UNICA. **O Processo Produtivo Da Cana-De-Açúcar**. 2015. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/usina-virtual/>>. Acesso em: 08 maio 2015.

UNICA. **Usina Virtual: Conheça O Processo Produtivo Da Cana-De-Açúcar**. 2015. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/usina-virtual/>>. Acesso em: 08 maio 2015.

WEG. **Geração de Energia**. São Paulo, 2015. Acesso em: 8 de Agosto, 2015.

ZANCANER, Mariana Garbarino. Cogeração: Ampliação da Oferta de Energia Elétrica com a Biomassa (bagaço da cana-de-açúcar). 2013. Vol 2. – Revista Diálogos Interdisciplinares – Fundação Armando Alvares Penteado, 2013. Acesso em: 24 de Julho, 2015.