



Universidade Federal  
de Campina Grande

**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**  
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

JOSÉ HELTON TAVARES MAIA

**ESTUDO DO POTENCIAL DA BIOMASSA DE BAGAÇO DE CANA-  
DE-AÇÚCAR NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA**

Campina Grande, Paraíba

Outubro de 2017

JOSÉ HELTON TAVARES MAIA

**ESTUDO DO POTENCIAL DA BIOMASSA DE BAGAÇO DE CANA-  
DE-AÇÚCAR NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Geração de Bioenergia

Orientador: Prof. Dr. Luis Reyes Rosales Montero

Campina Grande, Paraíba

Outubro de 2017

JOSÉ HELTON TAVARES MAIA

## **ESTUDO DO POTENCIAL DA BIOMASSA DE BAGAÇO DE CANA- DE-AÇÚCAR NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Geração de Bioenergia

Aprovado em: / /

---

**Professor Avaliador**

Avaliador

---

**Prof. Dr. Luis Reyes Rosales Montero**

Orientador, UFCG

Campina Grande, Paraíba

Outubro de 2017

Dedico este trabalho em especial à minha mãe Maria de Fátima, que não mediu esforços para que este sonho se realizasse, sem a compreensão, amor incondicional, ajuda e confiança dela, nada disso seria possível hoje. Ao meu pai Júnior, por sempre me apoiar e ficar feliz com minhas vitórias. Aos meus irmãos, Soérgila e Thales, pelo amor e ajuda para concretizar e encerrar mais uma caminhada da minha vida. Ao meu tio Luis (in memoriam), que infelizmente não pode estar presente neste momento tão feliz da minha vida, obrigado pelos valores e ensinamentos passados, obrigado por tudo, saudades eternas.

## **AGRADECIMENTOS**

Quero agradecer, em primeiro lugar, a Deus, por ser essencial em minha vida, autor do meu destino, meu guia, socorro presente na hora da angústia e que iluminou o meu caminho durante essa longa caminhada.

Ao professor Luis Reyes, pela orientação e incentivo que tornaram possível a conclusão deste TCC. Obrigado pela paciência e tempo despendidos.

Agradeço também a todos os professores que me acompanharam durante toda a graduação, e em especial professor Saulo Oliveira, professor Gutemberg Lira e professor Roberto Siqueira.

Aos meus amigos de curso e da vida, Welch, Ewerton, Joaquim, Hélivio, Alan, Ana Carolina e André Miranda (in memoriam), pelas alegrias, tristezas e dores compartilhadas. Com vocês, as pausas entre um parágrafo e outro foram mais leve e divertido. Sou grato pela amizade de vocês. Que Deus os abençoe.

Ao curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, às pessoas com quem convivi nesses espaços ao longo dos anos, à coordenação, e em especial Adail e Tchai, pelo convívio, apoio, compreensão e amizade.

A todos aqueles que de alguma forma estiveram e estão próximos de mim, fazendo esta vida valer cada dia mais a pena.

*“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas graças a Deus, não sou o que era antes”.*

*(Martin Luther King)*

## RESUMO

A biomassa é uma fonte de energia que vêm se destacando mundialmente como sendo uma das mais importantes fontes de energia renováveis. O Brasil é hoje referência mundial na geração de energia a partir de biomassa. Uma delas, focalizada neste trabalho, é a biomassa gerada pelo setor sucroalcooleiro, a qual, através da cogeração, pode contribuir significativamente para o fortalecimento da matriz brasileira. Apesar de há muito tempo disponível, observa-se que esta fonte tem sido subutilizada para a geração comercial de energia elétrica. Este trabalho tem como objetivo o estudo da contribuição da fonte da biomassa de cana-de-açúcar na matriz elétrica brasileira, mostrando quais as vantagens que a geração de energia através do bagaço da cana traz para o país, tanto em questões econômicas, como em aspectos ambientais. Pretende-se apresentar os processos de cogeração de energia, como os sistemas a vapor: caldeiras, turbinas e geradores. Além de analisar os custos e investimentos econômicos, impactos sociais e ambientais associados à produção de eletricidade a partir do bagaço de cana. Tendo em vista a relevância socioeconômica do tema, como também a questão ambiental, unidos ao fato de ter presenciado toda essa temática durante o estágio acadêmico, enxerguei a necessidade de uma discussão mais aprofundada do assunto, visto que a partir de 2001, por conta de racionamentos, sendo que a principal fonte da matriz elétrica continua sendo a hidroeletricidade, notou-se a deficiência nesse âmbito, fazendo com que ganhassem força outras fontes de energia, como no caso da biomassa, eólica e solar.

**Palavras-chave:** Biomassa; Setor Sucroalcooleiro; Cana-de-Açúcar; Cogeração.

## ABSTRACT

Biomass is a source of energy that has been emerging worldwide as one of the most important sources of renewable energy. Brazil is today a world reference in the generation of energy from biomass. One of them, focused on this work, is the biomass generated by the sugar and alcohol sector, which, through cogeneration, can contribute significantly to the strengthening of the Brazilian matrix. Although it has been available for a long time, it is observed that this source has been underutilized for commercial electricity generation. This work aims to study the contribution of the sugarcane biomass source in the Brazilian electric matrix, showing the advantages that the energy generation through sugarcane bagasse brings to the country, both in economic issues and in environmental aspects. It is intended to present the processes of energy cogeneration, such as steam systems: boilers, turbines and generators. In addition to analyzing the costs and economic investments, social and environmental impacts associated with the production of electricity from sugarcane bagasse. Given the socioeconomic relevance of the theme, as well as the environmental issue, together with the fact that I had witnessed this theme during the academic internship, I saw the need for a more in-depth discussion of the subject, since in 2001, on account of rationing, and the main source of the electric matrix continues to be hydroelectricity, it was noted the deficiency in this scope, causing other sources of energy, such as biomass, wind and solar, to gain strength.

**Keywords:** Biomass; Sugar and Alcohol Sector; Sugar cane; Cogeneration.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sequência de processos de conversão de energia durante a geração de eletricidade numa central termelétrica a vapor.....	25
Figura 2 - Esquema simplificado de sistema de potência a vapor.....	26
Figura 3 - Processo de moagem da cana e retirada do bagaço.....	27
Figura 4 - Pátio de manejo de bagaço em usina.....	28
Figura 5 - Cogeração em turbinas a vapor.....	28
Figura 6 - Circuito térmico na indústria sucroalcooleira antiga.....	29
Figura 7 - Circuito térmico na indústria sucroenergética moderna.....	30
Figura 8 - Esquema simplificado de uma caldeira de vapor.....	31
Figura 9 - Esquema de uma caldeira aquotubular.....	32
Figura 10 - Rotor de uma turbina de simples estágio.....	34
Figura 11 - Porta-palhetas com palhetamento fixo.....	35
Figura 12 - Palhetas móveis de uma turbina a vapor.....	35
Figura 13 - Esquema simplificado de turbina de contrapressão.....	36
Figura 14 - Esquema simplificado de turbina de condensação.....	37
Figura 15 - Redutor de velocidades.....	38
Figura 16 - Gerador síncrono.....	40
Figura 17 - Sincronoscópio analógico (esquerda) e digital (direita).....	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Matriz energética brasileira.....	16
Tabela 2 - Fontes de biomassa utilizadas no Brasil.....	17
Tabela 3 - Bioeletricidade gerada para o SIN 2016.....	19
Tabela 4 - Bioeletricidade gerada para o SIN em 2016 e 2017.....	20
Tabela 5 - Geração de Bioeletricidade 2010-2016.....	21
Tabela 6 - Quantidade de usinas novas e suas potências geradas entre 2017 e 2024.....	23
Tabela 7 - Dimensão média de todas as unidades de produção por estado.....	44
Tabela 8 - Percentual da destinação do bagaço por estado.....	45
Tabela 9 - Produção e utilização do bagaço nas unidades que comercializam energia elétrica.....	45
Tabela 10 - Produção e utilização do bagaço nas unidades que não comercializam energia elétrica.....	46
Tabela 11 - Destinação do bagaço combustível das unidades que comercializam a energia elétrica.....	46
Tabela 12 - Destinação do bagaço combustível de todas as unidades.....	47
Tabela 13 - Desempenho da geração elétrica das unidades que comercializam energia elétrica.....	48
Tabela 14 - Unidades produtoras por dimensão.....	49
Tabela 15 - Capacidade e geração por classe de unidades que comercializam energia elétrica.....	49
Tabela 16 - Capacidade e geração por classe de unidades que comercializam energia elétrica.....	50
Tabela 17 - Capacidade e geração por classe de unidades que não comercializam energia elétrica.....	50
Tabela 18 - Capacidade e geração por classe de todas unidades.....	50

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Acréscimo anual de capacidade instalada pela biomassa, 2002-2019, Brasil (MW).....	18
Gráfico 2 - Acréscimo anual de capacidade instalada pela biomassa, 2002-2019, Brasil (%).....	18
Gráfico 3 - Geração de bioeletricidade sucroenergética de 2005 a 2016 (TWh).....	21
Gráfico 4 - Evolução indicativa da matriz energética brasileira, em termos de participação das fontes na capacidade instalada total.....	23
Gráfico 5 - Complementaridade da bioeletricidade sucroenergética.....	52
Gráfico 6 - Estimativa para o mercado da bioeletricidade para a rede elétrica (2010 – 2021).....	53
Gráfico 7 - Distribuição percentual da geração entre classes que vendem e que não vendem energia elétrica.....	55
Gráfico 8 - Comparativo da energia excedente disponível para venda na situação atual e na situação simulada.....	56

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

PAP	Plano Anual do Proinfa
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
SIN	Sistema Interligado Nacional
BEN	Balanço Energético Nacional
MME	Ministério das Minas e Energia
UNICA	União da Indústria de Cana-de-Açúcar
OIEE	Oferta Interna de Energia Elétrica
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
PDE	Planos Decimais de Energia
PNE	Plano Nacional de Energia
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento

## LISTA DE SÍMBOLOS

MW	Megawatt
MWh	Megawatt-hora
KW	Quilowatt
KWh	Quilowatt-hora
TWh	Terawatt-hora
rpm	Rotação por minuto
rps	rotação por segundo
Hz	Hertz
T	Tonelada

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
1.1	PROINFA.....	14
1.2	OBJETIVOS.....	14
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	15
<b>2</b>	<b>A BIOMASSA DA CANA-DE-AÇÚCAR NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA .....</b>	<b>16</b>
2.2	CAPACIDADE DA GERAÇÃO DA BIOELETRICIDADE.....	17
2.2.1	A GERAÇÃO DE ENERGIA ENERGÉTICA PELA FONTE BIOMASSA EM GERAL .....	18
2.2.2	A GERAÇÃO DE ENERGIA ENERGÉTICA PELA FONTE BIOMASSA SUCROENERGÉTICA .....	20
2.3	PROJEÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA.....	22
<b>3</b>	<b>GERAÇÃO TERMELÉTRICA E A CONFIGURAÇÃO DA USINA TERMELÉTRICA .....</b>	<b>24</b>
3.2	GERAÇÃO TERMELÉTRICA .....	24
3.3	SISTEMA DE COGERAÇÃO.....	28
3.4	A EFICIÊNCIA NO SUPRIMENTO DA CARGA TÉRMICA .....	29
3.5	CONFIGURAÇÃO DA USINA TERMELÉTRICA .....	30
3.5.1	CALDEIRA.....	30
3.5.2	TURBINA A VAPOR.....	33
3.5.3	REDUTOR DE VELOCIDADES.....	38
3.5.4	GERADOR SÍNCRONO .....	39
<b>4</b>	<b>ESTUDO DO POTENCIAL ELÉTRICO DO BAGAÇO DA CANA NA REGIÃO NORTE – NORDESTE.....</b>	<b>43</b>
4.1	ESTATÍSTICAS DO POTENCIAL ELÉTRICO NA REGIÃO NORTE- NORDESTE A PARTIR DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR .....	43
4.1.1.A	PRODUÇÃO E A DESTINAÇÃO DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR	

<b>4.1.2.O</b>	<b>DESEMPENHO</b>	<b>NA</b>	<b>GERAÇÃO</b>	<b>TERMELÉTRICA</b>	
					<b>47</b>
<b>4.1.3.</b>	<b>AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO CONJUNTO DAS UNIDADES DE PRODUÇÃO DE</b>				
	<b>ACORDO COM O VOLUME DA CANA MOÍDA</b>				<b>49</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>				<b>52</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>				<b>58</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas vivenciamos um período de grande industrialização no Brasil e nos demais países, de uma maneira geral. Este crescimento acentuado só foi possível, primeiramente, pelo aumento da capacidade de fornecimento de energia, independentemente de sua origem. No entanto, o sentimento de que vale a pena crescer a qualquer custo parece ter sido alterado, e atualmente já podemos notar preocupações reais quanto à necessidade de um crescimento sustentável, que se faça valer dos recursos naturais sem impactar demasiadamente o meio ambiente.

Aliado a isso, as discussões que vem ocorrendo desde a década de 90, sobre a necessidade de garantir o acesso à energia elétrica com qualidade à população de baixa renda nos países em desenvolvimento, estimulam reflexões de como alcançar esse objetivo sem degradar o meio ambiente. Neste sentido, vários órgãos e iniciativas internacionais têm apoiado sistematicamente uma maior penetração das fontes renováveis de energia no cenário mundial.

O Brasil tem ganhado destaque no mundo inteiro devido ao uso de energias renováveis, principalmente quando se trata da produção de etanol para uso automotivo e eletricidade gerada através dos resíduos da cana-de-açúcar. O país que possui grande parte da energia elétrica proveniente de fonte hidrelétrica, responsável por 65,2% da energia utilizada no território nacional (BEN, 2015), já possui o uso de biomassa como o terceiro tipo de fonte na matriz elétrica.

A biomassa é uma fonte de energia que vêm se destacando mundialmente como sendo uma das mais importantes fontes de energia renováveis. Entende-se por biomassa toda matéria vegetal ou animal que pode ser reaproveitada como fonte de produção de calor ou eletricidade, como cana-de-açúcar, óleos vegetais, madeira, dejetos orgânicos e resíduos de indústrias alimentícias ou agrícolas (TEIXEIRA, 2010). O Brasil é hoje referência mundial na geração de energia a partir de biomassa.

Um setor em ascensão neste ramo é o sucroalcooleiro, que utiliza o bagaço (um subproduto do processo industrial) como combustível para geração de vapor. Este setor vem ganhando espaço no mercado nacional e internacional por conta da



diversificação e melhoria da sua produtividade. Um dos motivos desse avanço nessa área é a produção da chamada bioeletricidade. A bioeletricidade é uma energia limpa e renovável, feita a partir da biomassa: resíduos da cana-de-açúcar (bagaço e palha), restos de madeira, carvão vegetal, casca de arroz, capim-elefante e outras. No Brasil, 80% da bioeletricidade vêm dos resíduos da cana-de-açúcar.

Em 2010, a bioeletricidade da cana já ofereceu para os consumidores brasileiros o equivalente a mais de 20% da capacidade de geração anual de uma usina como Belo Monte. Mas temos potencial para ir além (UNICA, 2011).

A geração elétrica com a queima do bagaço não é novidade no setor sucroalcooleiro. De fato, a cogeração de energia elétrica como uma prática rotineira nas unidades sucroalcooleiras já tem décadas de existência. Essa tradição não é uma exclusividade brasileira e faz parte do processo industrial em todos os países que desenvolvem essa atividade. A grande novidade está na geração de excedentes exportáveis para o sistema elétrico nacional, que somente em tempos recentes está se transformando em negócio corrente e a maior parte de seu potencial ainda está por ser explorado.

A venda do excedente de energia elétrica como novo negócio, de forma bastante tímida, surgiu no final dos anos 80. Somente passou a ser seriamente discutida como uma fonte alternativa interessante a partir de 2001, quando o país passou por sérias dificuldades de oferta de energia e foi necessária a implementação de um severo programa de racionamento no consumo da energia elétrica e de racionalização de seu uso. As novas políticas públicas editadas a partir dessa época passaram a valorizar as fontes que requerem prazos curtos para instalação e funcionamento dos projetos e fontes alternativas de baixa emissão de carbono.

Dentro deste contexto é que foram desenvolvidos alguns programas para incentivar a geração termelétrica a gás natural e a cogeração a partir de biomassa, dentro da qual está o bagaço de cana, como o Proinfa. Dessa forma, a utilização da biomassa para geração de energia pode vir a se constituir num apoio à oferta de energia, não apenas nos momentos de crise energética, mas como um incremento à oferta de energia dentro do sistema interligado.

## 1.1 PROINFA

O Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa) foi instituído pela Lei nº 10.438/2002, conforme descrito no Decreto nº 5.025, de 2004. O Proinfa tem como objetivo aumentar a participação de fontes alternativas renováveis (pequenas centrais hidrelétricas, usinas eólicas e empreendimentos termelétricos à biomassa) na produção de energia elétrica, privilegiando empreendedores que não tenham vínculos societários com concessionárias de geração, transmissão ou distribuição.

Considerado o maior programa do mundo de incentivo às fontes alternativas de energia elétrica, o Proinfa contribuiu para a diversificação da matriz energética nacional, além de ter fomentado a geração de milhares de empregos diretos e indiretos em todo o país, proporcionando grande avanço industrial e internalização de tecnologia de ponta. Além disso, o programa possibilita a redução de emissões de gases de efeito estufa.

O cálculo das cotas é baseado no Plano Anual do Proinfa (PAP) elaborado pela Eletrobrás e encaminhado para a ANEEL. O custo do programa, cuja energia é contratada pela Eletrobrás, é pago por todos os consumidores finais (livres e cativos) do Sistema Interligado Nacional (SIN), exceto os classificados como baixa renda. O valor de custeio do Proinfa é dividido em cotas mensais, recolhidas por distribuidoras, transmissoras e cooperativas permissionárias e repassadas à Eletrobrás. Do valor total do custeio para o programa, R\$ 2,4 bilhões serão recolhidos pelas distribuidoras, R\$ 206,1 milhões pelas transmissoras e R\$ 17,7 milhões pelas cooperativas (permissionárias). O cálculo das cotas foi definido com base no mercado verificado no SIN, no período de setembro de 2013 a agosto de 2014.

## 1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo o estudo da contribuição da fonte da biomassa de cana-de-açúcar na matriz energética brasileira, mostrando quais as

vantagens que a geração de energia através do bagaço da cana traz para o país, tanto em questões econômicas, como em aspectos ambientais.

Pretende-se apresentar os processos de cogeração de energia, como os sistemas a vapor: caldeiras, turbinas e geradores. Além de analisar os custos e investimentos econômicos, impactos sociais e ambientais associados à produção de eletricidade a partir do bagaço de cana.

Será mostrado o levantamento do potencial elétrico na região Norte-Nordeste a partir do bagaço da cana-de-açúcar e os principais problemas que são enfrentados nos estados do Nordeste e alguns do Norte.

Tendo em vista a relevância socioeconômica do tema, como também a questão ambiental, unidos ao fato de ter presenciado toda essa temática durante o estágio acadêmico, enxerguei a necessidade de uma discussão mais aprofundada do assunto, visto que a partir de 2001, por conta de racionamentos, sendo que a principal fonte da matriz elétrica continua sendo a hidroeletricidade, notou-se a deficiência nesse âmbito, fazendo com que ganhassem força outras fontes de energia, como no caso da biomassa, eólica e solar.

### **1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO**

Basicamente a maneira como foi dividido este trabalho, permite apresentar uma visão clara do que vem a ser abordado ao decorrer dos capítulos, onde o Capítulo 1 mostra a parte introdutória, evidenciando o que é biomassa, o bagaço da cana-de-açúcar como biomassa, como funciona o Proinfa e por fim os objetivos.

No capítulo 2 é feito todo um estudo do papel da biomassa em geral e da biomassa do bagaço da cana na matriz energética brasileira, assim como uma análise da projeção do cenário para um futuro próximo da matriz.

No capítulo 3, descreveu-se a configuração de uma usina termelétrica movida a biomassa de cana, detalhando cada um dos seus componentes principais dentre os quais se destacam a caldeira, a turbina, o redutor de velocidades e o gerador síncrono.

No capítulo 4, apresentou-se várias informações sobre o potencial elétrico do bagaço da cana em todos os estados do Nordeste e alguns do Norte, evidenciando os principais problemas que essa região enfrenta.

No capítulo 5 foram explanadas as conclusões obtidas no trabalho, apontando algumas possibilidades de melhorias de eficiência energética para os principais problemas apontados no capítulo 4, a fim de aumentar o potencial de geração de bioeletricidade, e conseqüentemente ocasionar o crescimento na venda dos excedentes.

## 2 A BIOMASSA DA CANA-DE-AÇÚCAR NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

O Balanço Energético Nacional do Ministério das Minas e Energia (MME, 2007) mostra que a oferta brasileira de energia fundamenta-se principalmente nos combustíveis fósseis (carvão e petróleo) e na hidroeletricidade, e afirma que elas ainda terão, por muito tempo, papel importante na matriz energética nacional. O documento destaca também a necessidade de implementação de programas que busquem fontes alternativas de energia para que haja maior confiabilidade da oferta existente no mercado, lançando-se, desta forma, as bases para o desenvolvimento brasileiro.

Atualmente, segundo a UNICA (União da Indústria de Cana-de-Açúcar), a fonte biomassa representa 9% da potência outorgada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) na matriz energética do Brasil. Quando se estratifica a fonte fóssil, a bioeletricidade assume a segunda posição na matriz energética brasileira, pois a mais importante contribuição da fonte fóssil é o gás natural, que detém 13.717 MW, inferior à capacidade instalada pela fonte biomassa, conforme mostra a tabela a seguir.

Tabela 1: Matriz elétrica brasileira

<b>Fontes utilizadas no Brasil - Fase: Operação</b>		
Origem	Potência Outorgada (MW)	%
Fóssil	28.198	17,45
<b>Biomassa</b>	<b>14.302</b>	<b>9,03</b>
Nuclear	1.990	1,24
Hídrica	106.707	66,08
Eólica	11.287	6,19
Solar	236	0,02
<b>Total</b>	<b>162.721</b>	<b>100</b>

Fonte: ÚNICA (2017)

## 2.2 CAPACIDADE DA GERAÇÃO DA BIOELETRICIDADE

Com referência somente à bioeletricidade da cana, o setor sucroenergético detém hoje em torno de 7% da potência outorgada no Brasil e 78% da fonte biomassa, sendo a terceira fonte de geração mais importante da nossa matriz elétrica em termos de capacidade instalada, atrás somente da fonte hídrica e das termelétricas com gás natural (UNICA, 2017).

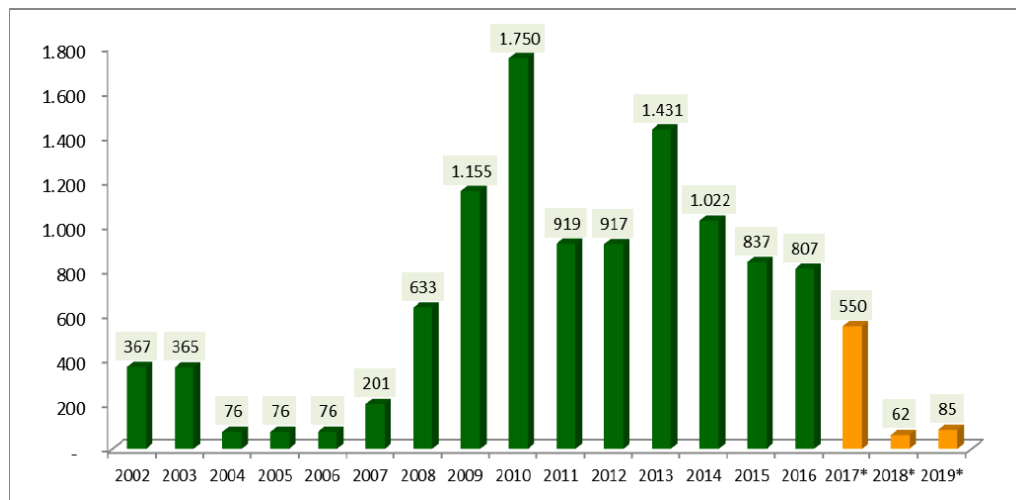
Tabela 2: Fontes de biomassa utilizadas no Brasil

<b>Fontes de biomassa utilizadas no Brasil - Fase: Operação</b>		
Origem	Potência Outorgada (MW)	%
<b>Biomassa da Cana de Açúcar</b>	<b>11.189</b>	<b>78,23</b>
Casca de Arroz	45	0,32
Biogás-AGR	2	0,01
Capim Elefante	66	0,46
Floresta	2.860	20,00
Resíduos sólidos urbanos	131	0,92
Resíduos animais	4	0,03
Biocombustíveis líquidos	5	0,03
<b>Total</b>	<b>14.302</b>	<b>100</b>

Fonte: ÚNICA (2017)

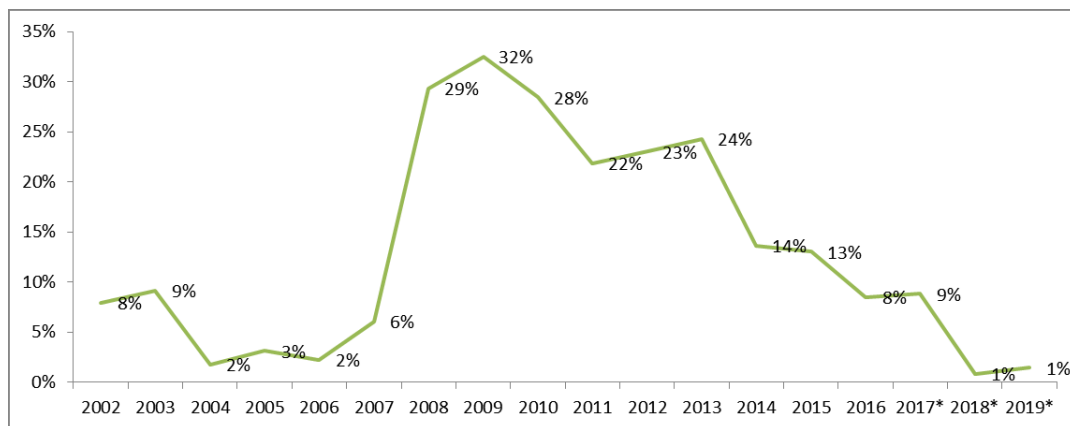
De acordo com o boletim da UNICA (2017), em termos de evolução anual de capacidade instalada, a fonte biomassa teve seu recorde no ano de 2010, com 1.750 MW (equivalente a 12,5% de uma Usina Itaipu), resultado de decisões de investimentos antes de 2008, quando o cenário era estimulante à expansão do setor sucroenergético. A fonte biomassa, que já chegou a representar 32% do crescimento anual da capacidade instalada no país, tem previsão de participar em 2017 com apenas 8% da expansão anual da capacidade instalada no Brasil, índice que poderá cair para apenas 1% em 2018 e 2019, como se pode observar a seguir.

Gráfico 1: Acréscimo anual de capacidade instalada pela biomassa, 2002-2019, Brasil (MW)



Fonte: ÚNICA (2017)

Gráfico 2: Acréscimo anual de capacidade instalada pela biomassa, 2002-2019, Brasil (%)



Fonte: ÚNICA (2017)

### 2.2.1 A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PELA FONTE BIOMASSA EM GERAL

Segundo o MME, em 2016, a bioeletricidade passou a ser a segunda fonte de geração mais importante na Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE) no país, superando o gás natural, algo que não ocorria desde 2011.

O total de geração pela biomassa em 2016 foi de 54 TWh, incluindo a autoprodução, representando 8,8% de toda a OIEE, enquanto o gás natural representou 8,1% no mesmo período. Já em comparação a 2015, a bioeletricidade aumentou sua produção em quase 10%. Esta geração inclui os diferentes combustíveis, sendo os principais aqueles derivados da biomassa da cana-de-açúcar, resíduos florestais e do licor negro presente na indústria de papel e celulose.

A geração com o bagaço e a palha da cana contribuiu com 36 TWh do total da fonte biomassa, ou 67%. Ainda de acordo com a CCEE, em julho de 2016 a fonte biomassa bateu seu recorde histórico em termos de representatividade da geração mensal para a rede em relação ao consumo nacional, chegando a representar 8,1% do consumo nacional de eletricidade naquele mês. (UNICA, 2017).

A seguir temos a tabela com a geração de bioeletricidade de todos os Estados brasileiros no ano de 2016, onde mostra que mais de 90% da geração para a rede esteve centralizada em apenas cinco estados: São Paulo, Mato Grosso do Sul, Goiás, Minas Gerais e Paraná. São Paulo foi o estado que mais gerou bioeletricidade, sendo responsável por 50% do volume total no período.

Tabela 3: Bioeletricidade gerada para o SIN 2016

<b>Bioeletricidade gerada para o SIN em 2016</b>		
<b>Estado</b>	<b>GWh</b>	<b>%</b>
SP	11.845	49,60%
MS	3.433	14,37%
GO	2.615	10,95%
MG	2.500	10,47%
PR	1.214	5,08%
BA	699	2,93%
MA	507	2,12%
MT	187	0,78%
AL	164	0,69%
PE	138	0,58%
RS	116	0,48%
TO	113	0,47%
PA	84	0,35%
SC	82	0,34%
SE	65	0,27%
RN	50	0,21%
ES	39	0,16%
PB	18	0,08%
PI	10	0,04%
RJ	3	0,01%
<b>Total</b>	<b>23.881</b>	<b>100</b>

Fonte: UNICA (2017)

## 2.2.2 A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PELA FONTE BIOMASSA SUCROENERGÉTICA

De acordo com os dados da CCEE, dentre o total de geração pela fonte bioeletricidade para o Sistema Interligado, a biomassa derivada da cana-de-açúcar respondeu por 90% do volume contabilizado em 2016, conforme indica a tabela a seguir.

Tabela 4: Bioeletricidade gerada para o SIN em 2016 e 2017

Bioeletricidade gerada para o SIN em 2016 e 2017				
Tipo de combustível	2016		Janeiro a junho/2017	
	GWh	%	GWh	%
Biomassa da Cana de Açúcar	21.236	89%	7.344	80%
Licor Negro	1.635	7%	605	7%
Biogás - Resíduos Animais	sem identificação	-	603	7%
Biogás - Resíduos Sólidos Urbanos	370	2%	329	4%
Resíduos Florestais	317	1%	73	1%
Outros	307	1%	217	2%
<b>Total</b>	<b>23.865</b>	<b>100%</b>	<b>9.173</b>	<b>100%</b>

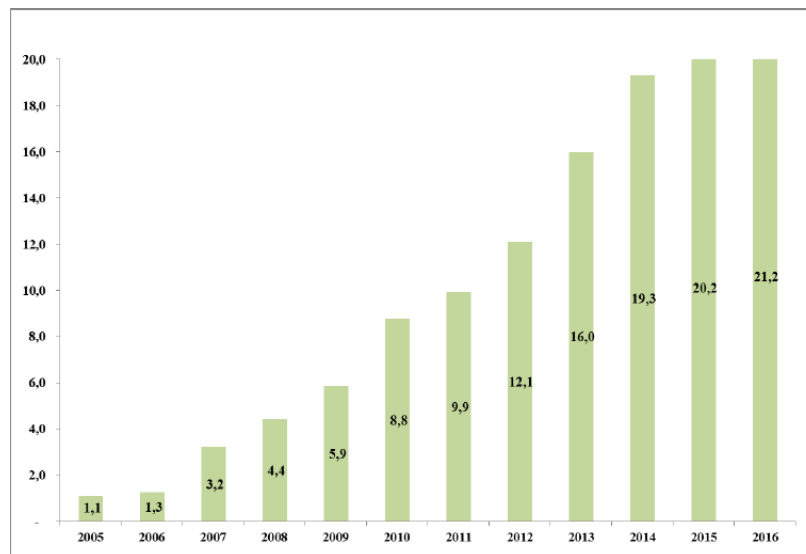
Fonte: CCEE (2017)

Podemos observar que até junho de 2017, a bioeletricidade sucroenergética ofertada para a rede foi de 7,34 TWh, em que segundo os estudos da CCEE, é o equivalente ao consumo anual de energia elétrica de mais de 3,8 milhões de unidades residenciais ou quase 50% da geração anual pela fonte carvão mineral.

No gráfico a seguir, é mostrado que até 2014, o setor sucroenergético evidenciou um crescimento anual significativo na oferta de eletricidade para o Sistema Interligado. No ano de 2013 para 2014, o crescimento na oferta de excedentes para a rede foi de 21%, porém no ano de 2015 foi de 5% e 4% em 2016, em comparação ao ano anterior.



Gráfico 3: Geração de bioeletricidade sucroenergética de 2005 a 2016 (TWh)



Fonte: 2005 a 2014: MME (2016) e 2015 a 2016: CCEE (2017)

De acordo com estudos do Ministério de Minas e Energia (MME) e da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), desde 2013, o setor sucroenergético vem gerando mais energia elétrica para o Sistema Interligado do que para o consumo próprio de suas unidades fabris, ficando numa relação 60% de energia para a rede e 40% para consumo próprio em 2016. Entre 2010 e 2016, em termos de indicador de kWh exportado para a rede elétrica por tonelada de cana processada, a bioeletricidade teve um acréscimo superior a 130%, segundo a tabela abaixo.

Tabela 5: Geração de Bioeletricidade 2010-2016

Geração de bioeletricidade sucroenergética, 2010-2016, Brasil							
Bioeletricidade sucroenergética	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Autoconsumo (em TWh)	13,6	12,3	13,0	13,9	13,3	13,7	15,0
Ofertado para a rede (em TWh)	8,8	9,9	12,1	16,0	19,3	20,2	21,2
<b>Total (em TWh)</b>	<b>22,4</b>	<b>22,2</b>	<b>25,1</b>	<b>29,9</b>	<b>32,6</b>	<b>33,9</b>	<b>36,2</b>
Indicador kWh por tonelada de cana	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Autoconsumo	21,90	22,02	22,04	21,34	20,98	20,55	22,96
Ofertado para a rede	14,15	17,75	20,56	24,57	30,45	30,29	32,58
<b>Total</b>	<b>36,05</b>	<b>39,77</b>	<b>42,59</b>	<b>45,91</b>	<b>51,43</b>	<b>50,84</b>	<b>55,54</b>

Fonte: 2010 a 2014: MME (2016) e 2015 a 2016: CCEE (2017)

Ainda segundo esses estudos, a oferta à rede pelo setor sucroenergético de 21,2 TWh em 2016 representou poupar 15% da água nos reservatórios do

submercado elétrico Sudeste/Centro-Oeste, justamente porque essa geração ocorre na época crítica do setor elétrico (período seco).

Essa energia renovável ofertada à rede foi equivalente a ter provido o atendimento a 11 milhões de residências ao longo de 2016 e evitado a emissão de 9,3 milhões tCO<sub>2</sub>, marca que somente seria atingida com o cultivo de 65 milhões de árvores nativas por 20 anos.

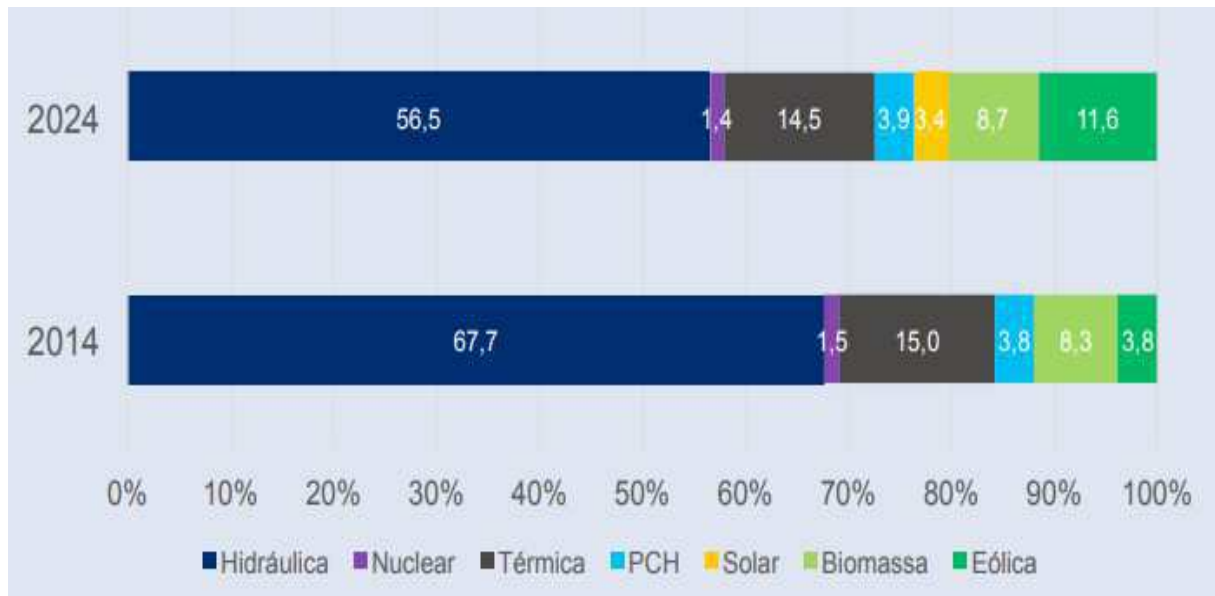
### **2.3 PROJEÇÃO DA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA**

O Brasil é um dos poucos países no mundo com uma matriz elétrica predominantemente renovável, baseada principalmente na hidroeletricidade. Porém, esta matriz está passando por um período de transição, em que a expansão da capacidade instalada e da geração hidrelétricas deve ocorrer a taxas inferiores às observadas no passado, levando à necessidade de ampliar a oferta de outras fontes de geração para atender ao crescimento da demanda.

O setor elétrico é um dos poucos a tradicionalmente contar com uma rotina de planejamento. Anualmente, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e o Ministério de Minas e Energia (MME) publicam os Planos Decenais de Energia (PDE), os quais trazem uma indicação de expansão da capacidade instalada no horizonte de 10 anos. Vale ressaltar que os PDEs também constituem os planos governamentais de mitigação das emissões de gases de efeito estufa para o setor de energia.

De acordo com o PDE mais recente (PDE 2024), a matriz elétrica brasileira continuará mantendo sua característica renovável na perspectiva de 10 anos, mesmo com a queda da participação das médias e grandes hidrelétricas com reservatório, o que se dará, dentre outros fatores, pela significativa expansão das energias renováveis não hídricas, como a biomassa e eólica.

Gráfico 4: Evolução indicativa da matriz elétrica brasileira, em termos de participação das fontes na capacidade instalada total



Fonte: EPE (2015)

A partir do Gráfico 4, observa-se que há um aumento de 4,82% na fonte biomassa entre os anos de 2014 e 2024. Além disso, segundo a UNICA, no cenário 2017-2024, de acordo com o último relatório de Acompanhamento de Expansão da Oferta de Energia Elétrica da ANEEL, é mostrada na Tabela 6 a seguinte projeção para novos projetos da fonte biomassa.

Tabela 6: Quantidade de usinas novas e suas potências geradas entre 2017 e 2024

Viabilidade	Qt UTEs	MW								Sem previsão
		2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	
Alta	12	418	32	0	38	0	0	0	0	0
Média	15	0	30	85	443	125	49	25	0	0
Baixa	10	0	0	0	0	0	0	0	0	438
<b>Total</b>	<b>37</b>	<b>418</b>	<b>62</b>	<b>85</b>	<b>481</b>	<b>125</b>	<b>49</b>	<b>25</b>	<b>0</b>	<b>438</b>
<b>Total fiscalizado (MW)</b>		<b>1682</b>								

Fonte: ANEEL (2017)

Onde a ANEEL considera a viabilidade de conclusão das obras de uma usina geradora conforme os seguintes critérios:

- Alta - Usinas com licença ambiental de instalação vigente e obras civis em andamento, não havendo impedimentos para implantação da usina;
- Média - Usinas com obras não iniciadas ou com licenciamento ambiental não finalizado, não havendo impedimentos para implantação da usina;
- Baixa - Usinas com suspensão do processo de licenciamento ambiental ou declaração de inviabilidade ambiental, processo de revogação em análise, demandas judiciais ou graves problemas que impeçam a implantação da usina.

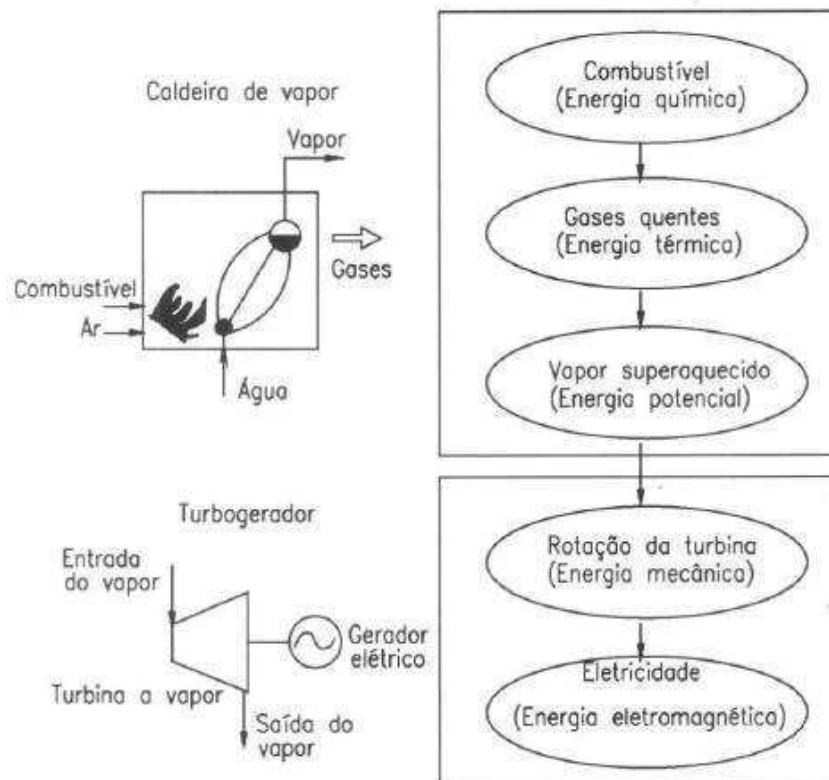
### **3 GERAÇÃO TERMELÉTRICA E A CONFIGURAÇÃO DA USINA TERMELÉTRICA**

Essencialmente a planta termelétrica deve ser constituída por um gerador de vapor e um turbogerador, o qual fica encarregado pela conversão de energia derivada do vapor em energia elétrica. Contudo, existem outros equipamentos essenciais no processo de geração termelétrica, os quais serão discutidos em maiores detalhes mais adiante.

#### **3.2 GERAÇÃO TERMELÉTRICA**

A conversão da energia química do combustível associado à água de alimentação da caldeira, em energia elétrica nos terminais do gerador é a função principal desse sistema. Este ciclo de conversão de energia e a atuação da caldeira e do turbogerador estão ilustrados na figura 1.

Figura 1: Sequência de processos de conversão de energia durante a geração de eletricidade numa central termelétrica a vapor



Fonte: LORA e NASCIMENTO

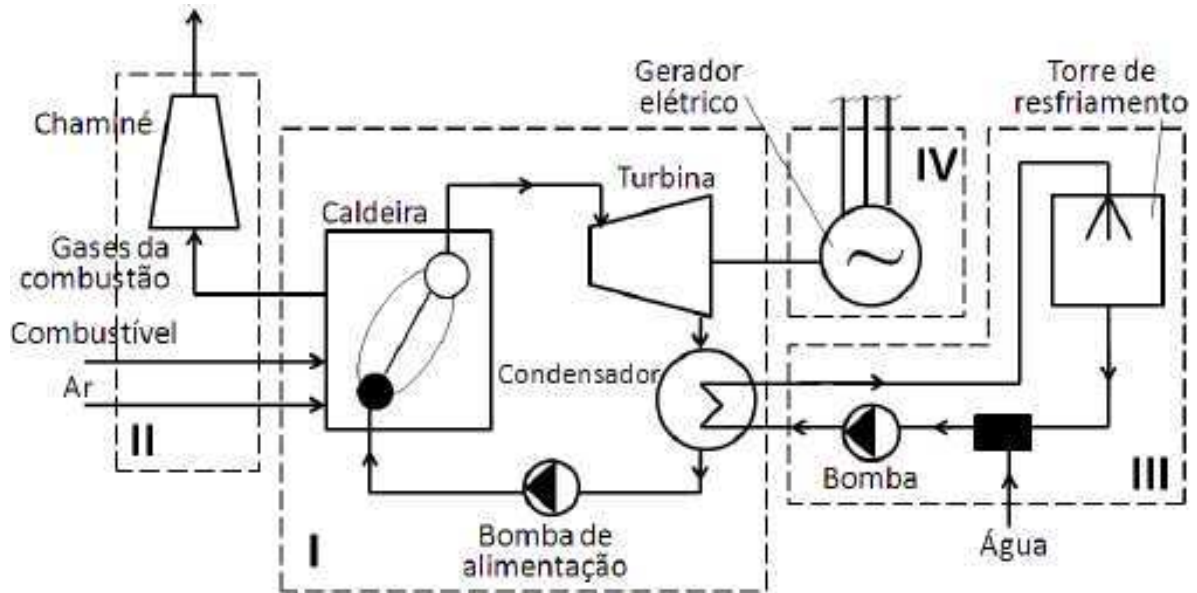
Os geradores de vapor, conhecidos como caldeiras, utilizam a energia química liberada durante a combustão da biomassa para proporcionar a mudança de fase da água do estado líquido para vapor, com uma pressão muito maior que a atmosférica. Nesse processo não há contato entre a água e a biomassa. O vapor resultante pode ser aproveitado para ser utilizado no acionamento de máquinas térmicas, acionamento de válvulas pneumáticas, geração de energia mecânica ou elétrica, ou para fins de aquecimento no processo industrial, como o cozimento do caldo da cana na fabricação do açúcar.

É importante evidenciar que, no ciclo típico de geração termelétrica a vapor, outros componentes primordiais também auxiliam. Dividindo-os em blocos, podem ser mencionados os seguintes equipamentos:

- I. Principais equipamentos do ciclo de geração de potência mecânica: caldeira, turbina a vapor, condensador e bomba de água de alimentação;
- II. Equipamentos de manuseio do combustível e exaustão dos gases de escape à atmosfera;
- III. Equipamentos do sistema de resfriamento de água do condensador e reposição de água ao ciclo;

#### IV. Gerador síncrono para conversão da energia mecânica em elétrica.

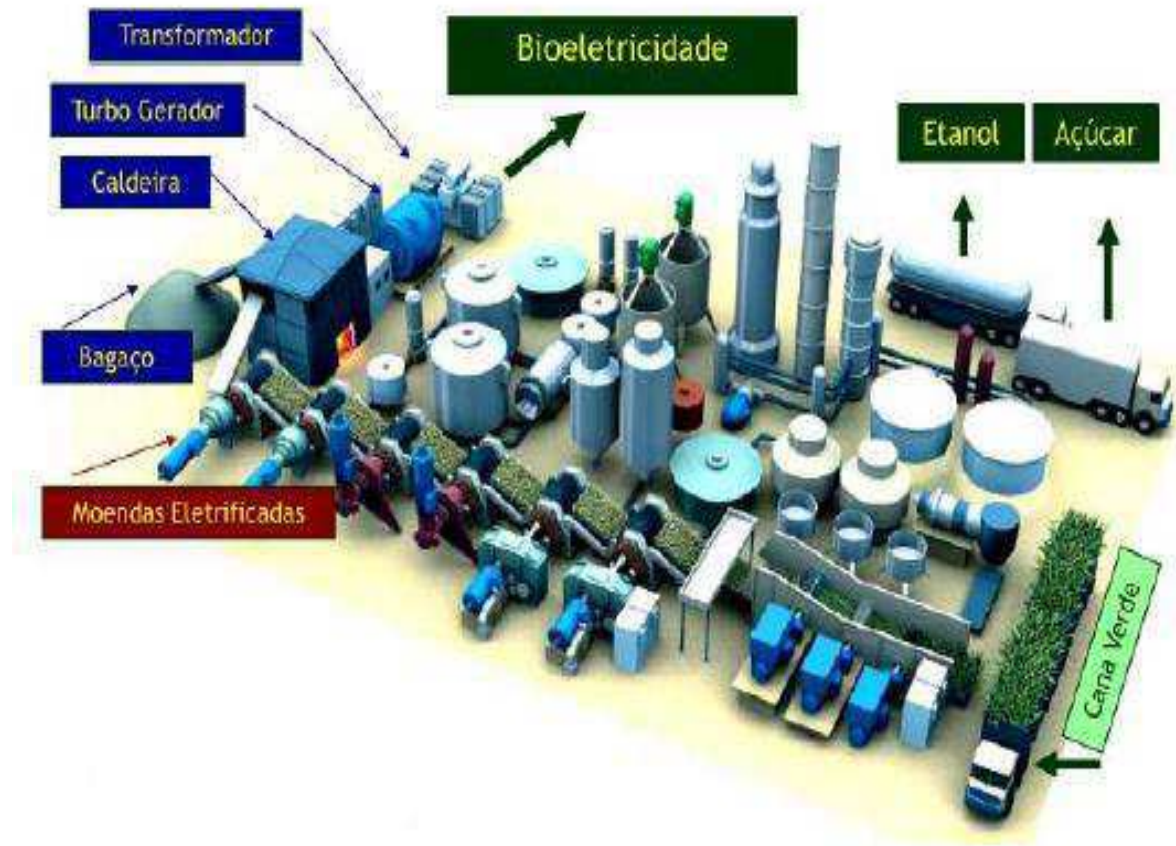
Figura 2: Esquema simplificado de sistema de potência a vapor



Fonte: LORA e NASCIMENTO

Vale ressaltar também a descrição do processamento da cana na usina, ou seja, ter uma visão geral de como o bagaço é extraído e seu destino na geração de bioeletricidade. O primeiro passo da cana na usina é o preparo, onde passa por picadores e desfibradores. Após este preparo a cana passa por diversos módulos da moenda para extração do caldo, conhecidos como ternos, o qual servirá a fabricação de açúcar e produção do etanol. Ao final da moenda, do colmo da cana sobra apenas o bagaço, que é a biomassa no caso. O bagaço é conduzido através de esteiras para o “pátio de bagaço”, onde fica armazenado, ou é encaminhado diretamente para a caldeira, assim ocasionando a geração de vapor.

Figura 3: Processo de moagem da cana e retirada do bagaço



Fonte: COGEN

Figura 4: Pátio de manejo de bagaço em usina

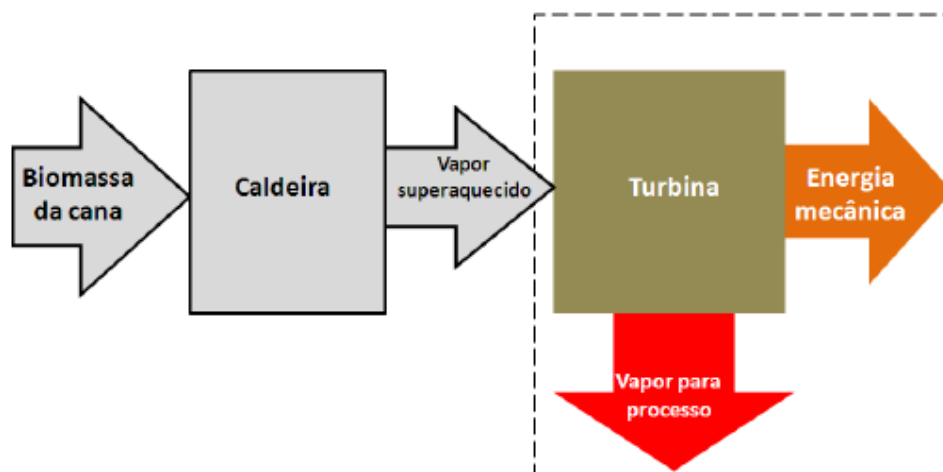


Fonte: PNE (2030)

### 3.3 SISTEMA DE COGERAÇÃO

O sistema de cogeração em usinas pode ser definido como sendo um processo de produção associada ao calor útil e energia mecânica a partir da energia química concedida pela biomassa da cana. As turbinas a vapor possuem esta peculiaridade em relação a outras máquinas motrizes para acionamentos de geradores elétricos. Além da geração de energia mecânica no eixo, há a possibilidade da extração de vapor sob determinadas condições de pressão e temperatura a partir da turbina, o qual é útil para o processo fabril da indústria de açúcar e álcool. Isto é, a turbina a vapor é capaz de fornecer dois tipos de energias a partir de uma única fonte.

Figura 5: Cogeração em turbinas a vapor





### 3.4 A EFICIÊNCIA NO SUPRIMENTO DA CARGA TÉRMICA

Em antigas usinas, no processo do preparo e da moenda, o vapor é utilizado para os acionamentos mecânicos por meio de turbinas a vapor que operam a média pressão na entrada. Em seguida a passagem do vapor através dos estágios da turbina, este perde pressão e temperatura. Estas turbinas são, então, planejadas para que a condição de vapor nos seu escape seja aproveitável para alimentação do processo de fabricação de açúcar e etanol. Este é o vapor de baixa pressão. Pressupondo que as turbinas de acionamentos mecânicos não disponibilizam vapor suficiente para o abastecimento do processo fabril, também são utilizadas turbinas de geração de energia elétrica para usufruir a energia do restante do vapor necessário para o processo industrial. Contudo, estas turbinas possuem baixa capacidade de geração de bioeletricidade, visto que o fluxo de vapor é pequeno e o nível de pressão de vapor (média pressão) restringe o potencial de geração, comparando com linhas de vapor de alta pressão. Nesta situação, a energia elétrica produzida será utilizada apenas para consumo interno da indústria.

Já nas usinas modernas, as caldeiras geralmente são de alta pressão para proporcionar a geração de bioeletricidade. Todo vapor de processo passa pela turbina. Isto é, toda energia potencial contida no vapor é utilizada para conversão em energia mecânica no eixo da turbina que, com o auxílio de um gerador síncrono, produzirá bioeletricidade. Visto que o preparo e a moenda não necessitam mais de vapor, já que os acionamentos são feitos via motores elétricos, será produzido um volume significativo de bioeletricidade com baixo consumo de vapor, e assim, além da energia elétrica ser suficiente para suprimento de toda indústria, há a exportação de excedentes de energia.

Figura 6: Circuito térmico na indústria sucroalcooleira antiga

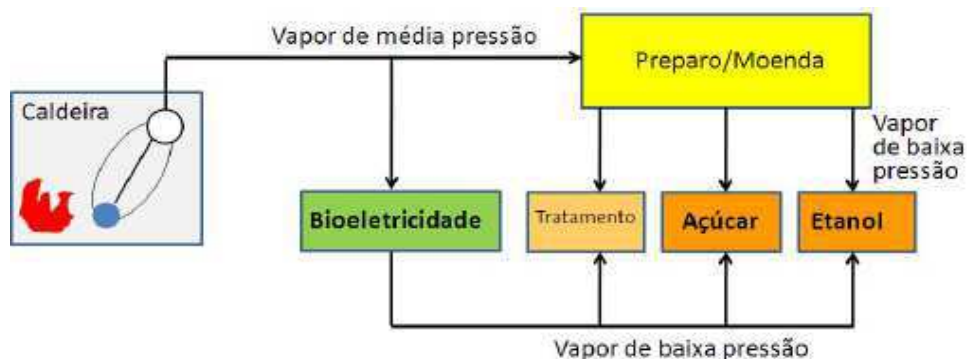
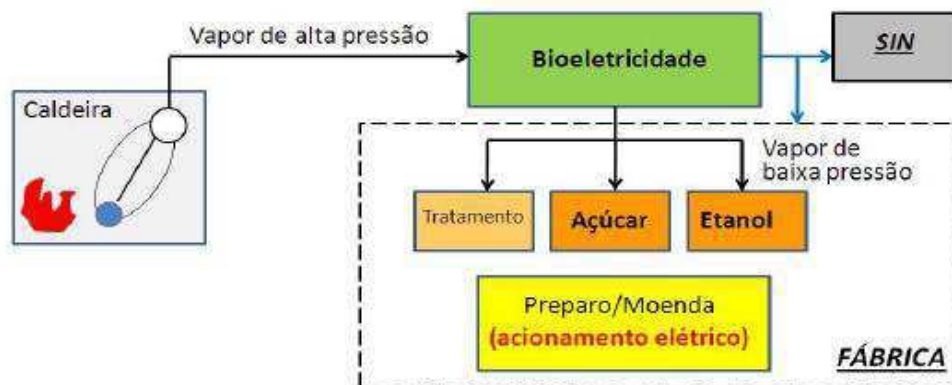


Figura 7: Circuito térmico na indústria sucroenergética moderna



### 3.5 CONFIGURAÇÃO DA USINA TERMELÉTRICA

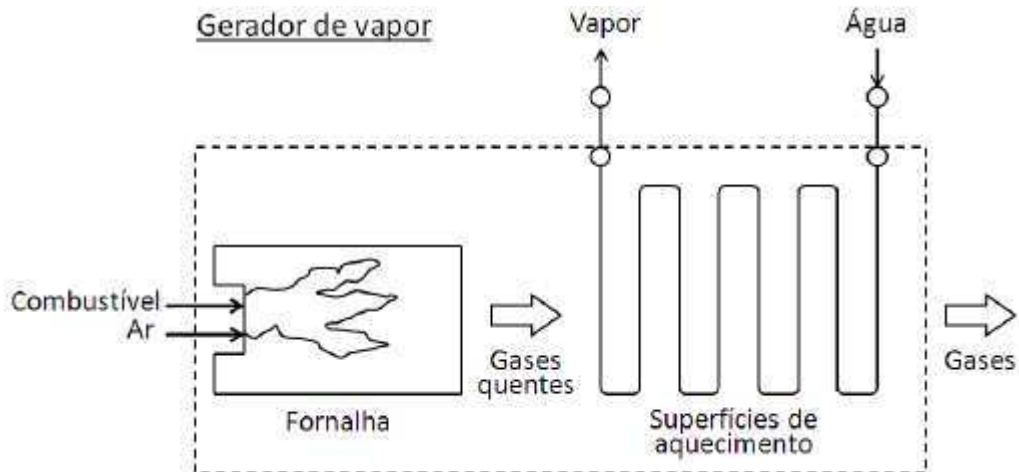
A usina termelétrica específica de uma indústria de açúcar, etanol e bioeletricidade é composta basicamente pelos seguintes equipamentos: caldeira geradora de vapor, turbina, gerador síncrono e sistema de condensação. Iremos explicitar as características de cada um destes equipamentos.

#### 3.5.1 CALDEIRA

O gerador de vapor, chamado caldeira, é um equipamento que utiliza a energia química fornecida durante a queima de um combustível para proporcionar a mudança de fase da água do estado líquido para vapor, com uma pressão muito superior à atmosférica. Nas usinas termelétricas, este vapor resultante é designado primeiramente ao acionamento de turbinas na geração de energia elétrica. Paralelo a isso, esse vapor pode ser utilizado para fins de aquecimento ou acionamento no processo industrial, assim formando o processo de cogeração.

Mostrando de forma simplificada, a figura 8 enfatiza os dois elementos principais de uma caldeira de vapor: a fornalha, onde ocorre a queima do combustível, e as superfícies de aquecimento, onde ocorre a troca de calor dos gases com o fluido de trabalho, neste caso a água.

Figura 8: Esquema simplificado de uma caldeira de vapor



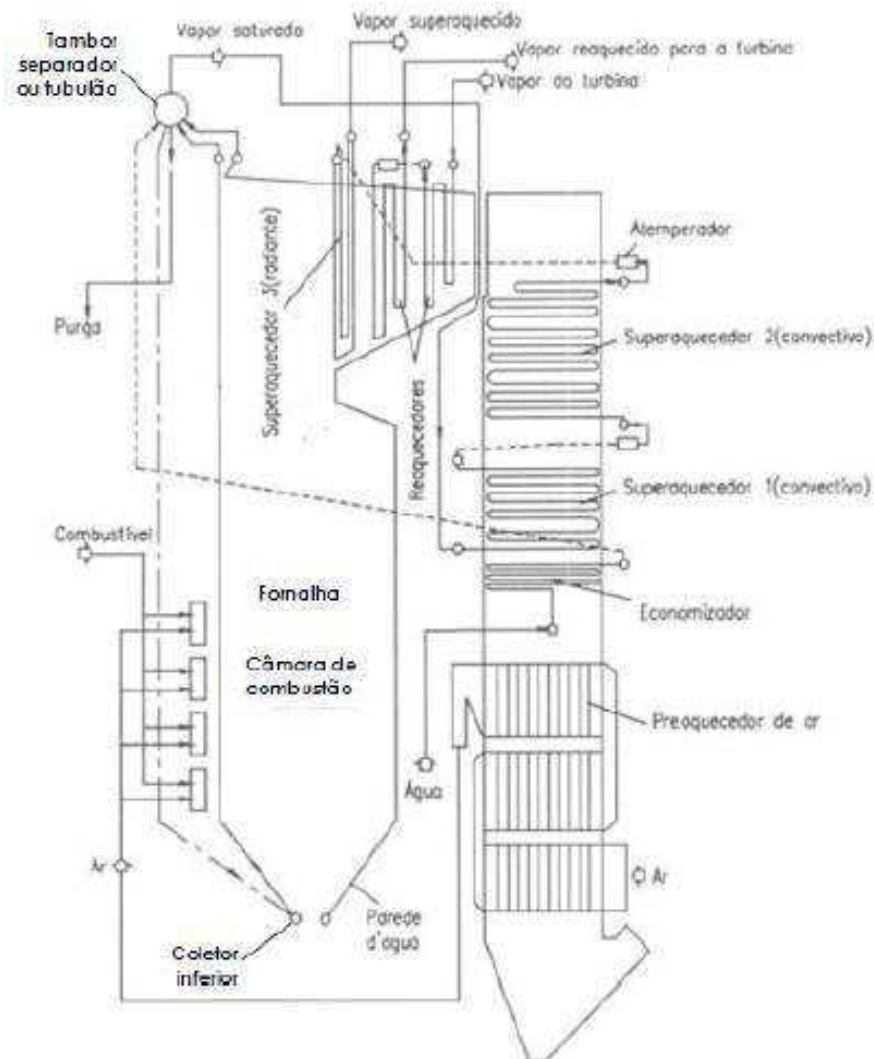
Fonte: LORA E NASCIMENTO

De acordo com os principais critérios, as caldeiras podem ser flamotubulares ou piro-tubulares, onde os gases fluem por dentro de tubos imersos em água, ou podem ser aquotubulares, onde a água circula pelo interior dos tubos e os gases trocam calor com a água através da parede dos mesmos. Sua força motriz para a circulação do fluido de trabalho pode ser: natural, em que a circulação do fluido de trabalho pelo interior dos tubos ocorre devido à diferença de densidade da água líquida e a mistura água-vapor; forçada, onde são utilizadas bombas de recirculação; ou passe único, onde a água é forçada por bomba de alimentação a passar uma única vez pela tubulação, e nesse caso não há recirculação de água. Para o processo de combustão, têm-se: grelha fixa ou rotativa, o qual é próprio para queima de biomassa ou resíduos agroindustriais; queima em suspensão, ideal para combustível sólido pulverizado, óleo combustível e gás natural; leito fluidizado (borbulhante ou circulante), ideal para queima de combustíveis sólidos em geral.

Nas centrais termelétricas as caldeiras são projetadas para gerar vapor superaquecido, em alta pressão e temperatura, no intuito de alcançar um maior nível de energia térmica do vapor, medida pela entalpia, para geração de energia elétrica nos turbogeradores. Pelo motivo do sistema necessitar vapor superaquecido por este dispor um maior conteúdo energético e estar desprovido de condensado (água no estado líquido), o qual pode provocar danos à turbina. Com isso, é necessária a utilização de caldeiras aquotubulares, já que a capacidade de fluxo de vapor e a taxa de produção de calor por área são maiores que nas caldeiras flamotubulares.

O sistema de circulação optado foi o sistema forçado por bomba de recirculação. Isto determina que as caldeiras sejam mais compactas já que o fluido de operação fica sujeito à alta pressão, permitindo diâmetros menores dos tubos de circulação. A tecnologia de combustão empregada, geralmente, é a de grelha fixa, basculante ou rotativa, própria para queima de biomassa. A seguir é apresentado uma caldeira aquotubular usualmente empregada para queima de biomassa.

Figura 9: Esquema de uma caldeira aquotubular



Fonte: LORA e NASCIMENTO

Os principais componentes deste tipo de caldeira são:

- Tambor separador ou tubulão – corpo cilíndrico de aço que recebe a água de alimentação. A água é distribuída para as paredes de água e feixe tubular e, durante seu retorno para o tambor, ocorre a mudança de fase de parte da água em vapor;

- Coletor inferior – corpo cilíndrico de aço similar ao tambor, porém, com diâmetro menor. Tem a função de distribuir a água pelos tubos da caldeira;
- Fornalha – local onde ocorre a queima do combustível;
- Paredes de água – tubos que interligam o tambor superior aos coletores inferiores, revestindo a parte interior das paredes da fornalha;
- Superaquecedor – trocador de calor localizado após a câmara de combustão, com a função de superaquecer o vapor saturado (aquele que se encontra no limiar entre a temperatura de condensação e evaporação) proveniente do tambor. É no superaquecedor radiante que se tem maior temperatura do fluido de trabalho;
- Economizador – trocador de calor com a função de aquecer a água de alimentação antes de sua entrada no tambor. Utiliza a energia residual dos gases de combustão, resultando num aumento de eficiência da caldeira;
- Atemperador – trocador de calor necessário para controle da temperatura do vapor superaquecido. Pelo interior dos tubos circula uma parte da água fria de alimentação. Através desta vazão de água injetada no fluxo de vapor superaquecido é que se controla o nível de temperatura;
- Preaquecedor de ar – trocador de calor com a função de elevar a temperatura de ar empregado na combustão. Tal como o economizador, recupera uma parte da energia residual dos gases de combustão.

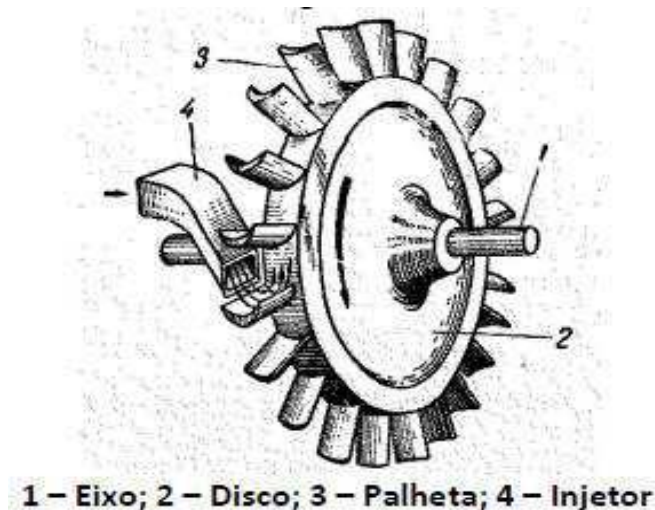
### 3.5.2 TURBINA A VAPOR

A turbina a vapor é uma máquina térmica rotativa, onde a energia térmica do vapor é convertida em energia cinética devido à sua expansão através dos bocais. A energia mecânica gerada através do movimento no eixo da turbina (oriundo da energia cinética) pode ser utilizada para acionamentos de equipamentos como compressores, ventiladores e bombas, e para geração de energia, acionando um

gerador síncrono. As turbinas a vapor possuem uma grande vantagem por conta da possibilidade da utilização da energia térmica do vapor em processos industriais através de extrações reguláveis na sua seção de fluxo após o uso de parte deste potencial térmico do vapor para geração de energia mecânica no eixo. Isto é, a turbina a vapor pode ser utilizada como geradora de energia térmica e mecânica (ou elétrica quando há o acionamento de gerador síncrono) simultaneamente, destacando o processo de cogeração.

O princípio de funcionamento de uma turbina a vapor é baseado na atuação do vapor por meio de um injetor sobre as palhetas móveis fixadas ao eixo da turbina. Este processo é mostrado na figura a seguir.

Figura 10: Rotor de uma turbina de simples estágio



Fonte: SHLYAKHIN

O injetor direciona o vapor para as palhetas móveis que são encarregados pela conversão da energia cinética em trabalho mecânico gerando movimento no eixo.

A turbina a vapor é constituída basicamente de um estator e um rotor, assim como a configuração de um gerador elétrico. O estator é a parte fixa da máquina, enquanto o rotor é a parte móvel e encarregada pela transmissão da energia mecânica gerada. O estator é constituído pela carcaça que suporta o palhetamento fixo, responsável pelo direcionamento e injeção do vapor no palhetamento móvel do rotor. As palhetas fixas podem ser encaixadas diretamente na carcaça principal ou

montadas em anéis-suportes presos à carcaça. Estes anéis-suportes são conhecidos como porta-palhetas e é mostrado na figura a seguir.

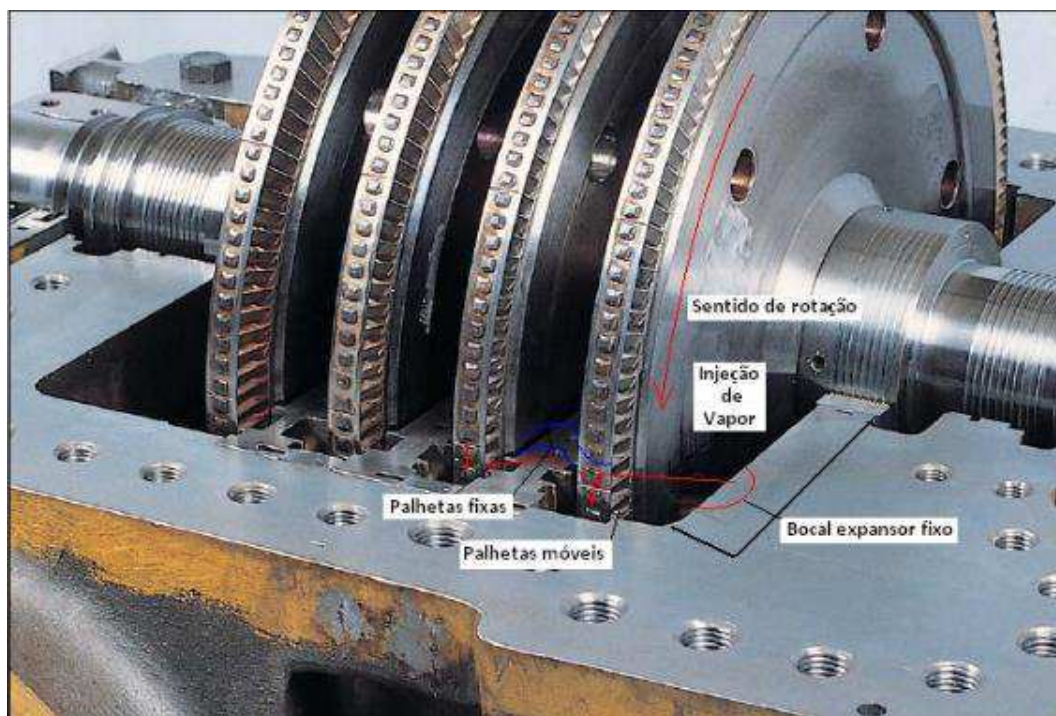
Figura 11: Porta-palhetas com palhetamento fixo



Fonte: Siemens

As palhetas móveis têm a finalidade de receber o impacto ou expansão do vapor derivados do palhetamento fixo (que atuam como injetores) para movimentação do rotor.

Figura 12: Palhetas móveis de uma turbina a vapor

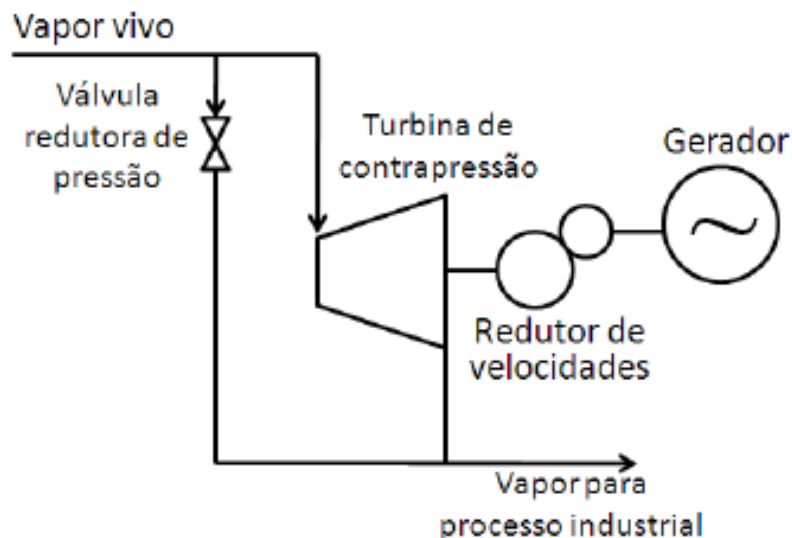


Fonte: SHORTCOURSE

Quanto ao tipo de turbinas, elas podem ser classificadas quanto à descarga de vapor em dois tipos: contrapressão e condensação.

A turbina de contrapressão é utilizada quando se deseja que o vapor na saída da turbina esteja a uma pressão igual ou superior à atmosférica. Neste tipo de turbina o nível de pressão do vapor de descarga (conhecido como escape) é mensurado de acordo com a necessidade do processo industrial no qual o vapor será utilizado. Considerando-se que o escape da turbina de contrapressão é conectado à linha de suprimento de vapor para o processo industrial, o balanço de operação deste tipo de turbina dependerá da necessidade de vapor na fábrica. Ou seja, a geração de energia elétrica, que está diretamente associada ao fluxo de vapor na entrada da turbina (igual ao fluxo na saída), será determinada pela demanda de energia térmica da indústria. Caso ocorra alguma falha durante a operação da turbina, mesmo afetando a geração de energia elétrica, não há o comprometimento o suprimento de vapor para o processo, já que pode ter a construção de uma linha paralela de vapor com uma válvula redutora de pressão para garantir a continuidade do processo industrial.

Figura 13: Esquema simplificado de turbina de contrapressão



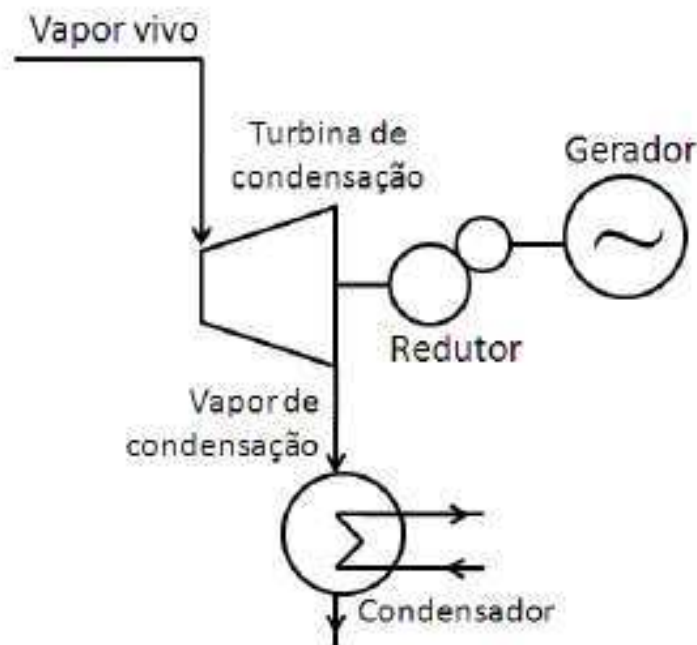
Fonte: LORA e NASCIMENTO

A turbina de condensação é utilizada em aplicações exclusivas para geração de energia, sem conexão de vapor com um processo industrial. Esta turbina descarrega o vapor para um condensador a uma pressão inferior à atmosférica (geralmente alto vácuo), com o intuito de aumentar a absorção da energia térmica



do vapor mediante o aumento máximo da queda de pressão. Quando o vapor se encontra no limiar entre a temperatura de condensação e evaporação, submetido a níveis de pressão muito baixos no escape da turbina, promove uma grande dissipação de energia devido à expansão do vapor dentro da máquina. Este é o conceito da aplicação de turbinas de condensação, já que o vapor não é aproveitado para suprimento de processos industriais. O escape da turbina é diretamente interligado a um condensador de vapor a fim de que o vapor saturado retorne ao estado líquido, e assim o condensado retorna a caldeira através de bombas, formando um ciclo fechado denominado de ciclo Rankine.

Figura 14: Esquema simplificado de turbina de condensação



Fonte: LORA e NASCIMENTO

No caso da turbina de condensação, o fluxo de vapor na entrada da turbina deverá variar em função da demanda de energia elétrica, já que não estará associada à demanda de energia térmica do processo industrial tendo em vista que esta turbina não abastece o processo com vapor.

### 3.5.3 REDUTOR DE VELOCIDADES

Na maioria das aplicações a rotação do eixo da turbina é superior à rotação do eixo do gerador. A rotação do gerador é dependente da frequência da rede elétrica e ao número de polos da máquina. A rotação da turbina é determinada por parâmetros que envolvem o projeto construtivo da máquina como diâmetro do rotor, altura das palhetas móveis, potência requerida, resistência mecânica dos componentes, entre outros fatores. No caso onde as duas máquinas possuem rotações diferentes, utiliza-se o redutor de velocidades para que ocorra a transmissão de torque do eixo da turbina para acionamento do gerador.

O redutor é composto por uma caixa de engrenagens de eixos paralelos (normalmente um par coroa-pinhão), onde estes eixos são apoiados sobre mancais de deslizamento lubrificadas e refrigerados por óleo. Na maioria dos casos, possuem pontas de eixo flangeadas para o acoplamento com a máquina motriz (turbina) e com a máquina acionada (gerador).

Figura 15: Redutor de velocidades



Fonte: AUTOR, 2017

Nas indústrias sucroalcooleiras, as turbinas podem atingir até 12.000 rpm. Visto que a rotação de entrada do redutor é igual à rotação da turbina e a rotação de saída igual à do gerador. Sendo que as turbinas a vapor destinada à geração operam com velocidade de rotação constante.

A relação de transmissão de um redutor é determinada por:

$$i = \frac{n1}{n2}$$

Onde:

i = relação de transmissão

n1 = rotação de entrada

n2 = rotação de saída

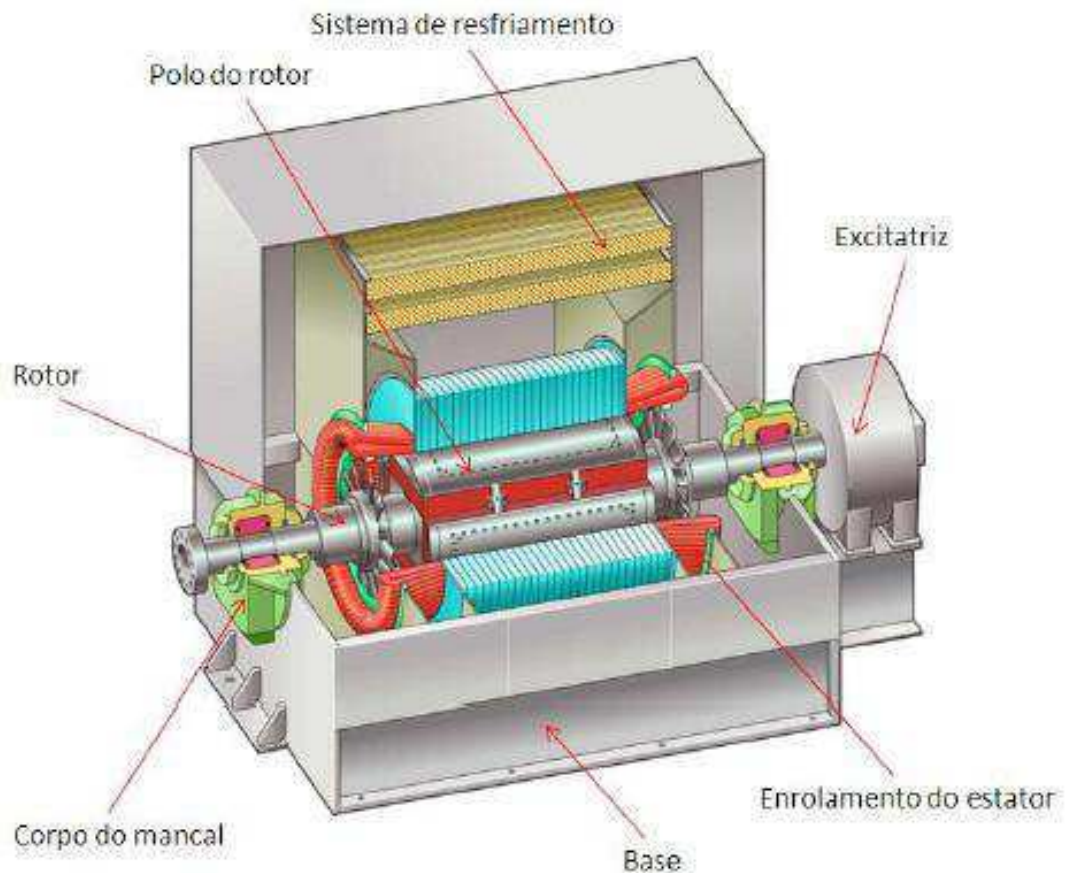
Pressupondo que os geradores para este tipo de aplicação no Brasil possuem 4 polos e operam com rotação de 1.800 rpm, os respectivos redutores de velocidade podem atingir uma relação de transmissão de 6,67.

#### **3.5.4 GERADOR SÍNCRONO**

O gerador ou alternador é a máquina responsável pela conversão da energia mecânica, fornecida pela turbina, em energia elétrica. Esta conversão se dá através da interação eletromagnética entre as bobinas do rotor e do estator do gerador, os quais são os componentes principais da máquina.

O rotor é o elemento girante, acoplado mecanicamente ao eixo da turbina através do redutor. O estator ou armadura é o componente fixo, montado na carcaça do gerador. No estator é induzida uma tensão elétrica por meio de um campo criado no rotor.

Figura 16: Gerador síncrono



Fonte: SIEMENS

Os principais componentes do gerador são:

- Estator ou armadura – parte fixa presa à carcaça do gerador e que aloja os enrolamentos que são submetidos à indução e produzem a força eletromotriz. Este é o induzido da máquina;
- Rotor – parte girante que aloja as bobinas de campo. Estas bobinas são responsáveis pela indução eletromagnética nas bobinas da armadura. Este é o indutor da máquina;
- Mancais – peças que promovem a sustentação do rotor. Estas são continuamente lubrificadas por óleo durante a operação a fim de facilitar o movimento de rotação do eixo e refrigerar o ponto de contato entre os componentes;
- Excitatriz – fonte de corrente contínua responsável pela alimentação das bobinas do indutor a fim de controlar o nível de tensão do gerador;

- Sistema de refrigeração – podem ser o tipo de ar – ar ou ar – água. Responsável por manter a temperatura do gerador sob determinados limites operacionais.

Os geradores empregados em termelétricas a biomassa da cana são de eixo horizontal, de pequeno diâmetro e longo comprimento. E são do tipo síncrono trifásico, isto é, cuja rotação de operação está diretamente relacionada ao número de polos magnéticos e a frequência, de acordo com a equação a seguir.

$$\eta = \frac{f}{p}$$

Onde:

$\eta$  = rotação do eixo (rps)

$f$  = frequência (Hz)

$p$  = par de polos magnéticos

Na composição do turbogerador, o gerador é a parte do conjunto que está conectada mecanicamente à máquina motriz e eletricamente à carga. Através de seu sistema de controle e assegurado por dispositivos de proteção nas instalações elétricas, o gerador pode suprir de energia tanto cargas internas da indústria quanto a rede elétrica local, simultânea ou individualmente. Assim como podem operar em paralelo com outros geradores.

Há também a necessidade do sincronismo entre o gerador e o barramento energizado. Como os geradores estão ligados a um barramento considerado infinito, se estabelecem nas mesmas condições de tensão, frequência e fase deste barramento, e isso são devido à potência de sincronismo, que força o gerador a tais condições.

Sendo assim, as seguintes condições são necessárias para que se possa sincronizar um gerador a um barramento:

- A tensão terminal do gerador deve ser a mesma do barramento;
- A frequência do barramento deve ser idêntica à velocidade de rotação do gerador (propriamente adaptada, dependendo do seu número de polos);

- A fase do gerador deve ser idêntica à fase do barramento, além disso, a sequência de fases deve ser a mesma (o que geralmente é feito durante a instalação do mesmo).

Uma forma de checagem é através de um sincronoscópio. A figura a seguir mostra um sincronoscópio analógico e um digital.

Figura 17: Sincronoscópio analógico (esquerda) e digital (direita)



## **4 ESTUDO DO POTENCIAL ELÉTRICO DO BAGAÇO DA CANA NA REGIÃO NORTE – NORDESTE**

A bioeletricidade é uma energia limpa e renovável, feita a partir da biomassa: resíduos da cana-de-açúcar (bagaço e palha), restos de madeira, carvão vegetal, casca de arroz, capim-elefante e outras. No Brasil, 80% da bioeletricidade vêm dos resíduos da cana-de-açúcar. Cada tonelada de cana-de-açúcar moída na fabricação de açúcar e etanol gera, em média, 250 kg de bagaço e 200 kg de palha e pontas. Com alto teor de fibras, o bagaço de cana, desde a revolução industrial, tem sido empregado na produção de vapor e energia elétrica para a fabricação de açúcar e etanol, garantindo a autossuficiência energética das usinas durante o período da safra (UNICA, 2011).

Como já foi referenciado, além de permitir a cogeração de energia nas usinas, desde a década de 1980 o bagaço tem permitido a geração de excedentes de energia elétrica que são fornecidos para o sistema elétrico brasileiro. De acordo com a UNICA, em 2010, a bioeletricidade da cana já ofereceu para os consumidores brasileiros o equivalente a mais de 20% da capacidade de geração anual de uma usina como Belo Monte, porém o país possui capacidade para gerar bioeletricidade além da parcela atual. Hoje, menos de 30% das usinas do setor estão conectadas à rede elétrica como geradoras de energia. O potencial de geração de bioeletricidade que possuímos é equivalente a 3 usinas de Belo Monte. Sem desperdício e evitando emissões de gases de efeito estufa.

### **4.1 ESTATÍSTICAS DO POTENCIAL ELÉTRICO NA REGIÃO NORTE-NORDESTE A PARTIR DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR**

Neste subcapítulo serão apresentados os dados processados da coleta a partir de um estudo realizado pela Conab (Companhia Nacional de Abastecimento) da safra de cana-de-açúcar 2009-2010, sendo o foco desse estudo a região Norte-Nordeste. Todas as informações apresentadas separam o comportamento das unidades que declararam vender parte da energia gerada daquelas que informaram que produzem energia elétrica apenas para consumo em seu complexo produtivo.

#### 4.1.1. A PRODUÇÃO E A DESTINAÇÃO DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR

Iremos tratar do volume da oferta do bagaço da cana, nos estados da região Norte-Nordeste que desenvolvem esta atividade. A tabela 7 irá mostrar o tamanho médio das unidades de produção, mensuradas de acordo com a quantidade de cana moída no período da safra, por estado e grande região.

Tabela 7: Dimensão média de todas as unidades de produção por estado

ESTADO/REGIÃO	MÉDIA DA CANA MOÍDA PELAS UNIDADES QUE VENDEM ENERGIA ELÉTRICA (t)	MÉDIA DA CANA MOÍDA PELAS UNIDADES QUE NÃO VENDEM ENERGIA ELÉTRICA (t)	MÉDIA DA CANA MOÍDA POR TODAS AS UNIDADES VISITADAS (t)
AL	1.397.005,8	818.357	1.011.240
PE	980.343,1	759.795	829.970
PB	1.045.057,9	649.587	693.528
RN	1.889.869,7	541.936	878.920
BA	907.518,5	395.676	523.637
SE	252.011,0	244.202	246.805
MA, PI, CE	958.714,2	241.922	307.085
AM, TO, PA	476.810,4	134.503	220.080
<b>TOTAL DA REGIÃO NORTE-NORDESTE</b>	<b>1.082.747,3</b>	<b>585.479</b>	<b>715.716</b>
<b>BRASIL</b>	<b>2.549.509,7</b>	<b>1.134.401</b>	<b>1.534.088</b>

Fonte: CONAB (2011)

Na tabela 8, são mostrados os dados sobre a proporção, por estado e grande região, do bagaço obtido da moagem da cana. Esta proporção está associada à condição genética da própria planta e apresenta pequena variação de acordo com a cultivar em uso. Esse fato está refletido nos resultados apresentados, que são bastante homogêneos. O mesmo quadro mostra também que o uso alternativo do bagaço é bastante restrito e a quase totalidade do produto disponível é destinada aos queimadores para seu uso como combustível.



Tabela 8: Percentual da destinação do bagaço por estado

ESTADO/REGIÃO	PROPORÇÃO DO BAGAÇO COMBUSTÍVEL NA CANA MOÍDA (%)	PROPORÇÃO DO BAGAÇO PARA OUTROS USOS NA CANA MOÍDA (%)	TOTAL DO BAGAÇO PRODUZIDO (%)
AL	25,8%	2,9%	28,7%
PE	28,1%	1,3%	29,4%
PB	25,5%	3,9%	29,5%
RN	24,2%	3,8%	28%
BA	26,8%	0,8%	27,6%
SE	22,7%	5,9%	28,6%
MA, PI, CE	27%	2,2%	29,2%
AM, TO, PA	27%	0%	27%
<b>TOTAL DA REGIÃO NORTE-NORDESTE</b>	<b>26,4%</b>	<b>2,5%</b>	<b>28,9%</b>
<b>BRASIL</b>	<b>24,6%</b>	<b>3,1%</b>	<b>27,7%</b>

Fonte: CONAB (2011)

Na tabela 9, são apresentados os números com a quantidade, em toneladas, do bagaço produzido por estado e sua destinação nas unidades que comercializam a energia excedente. Já a tabela 10 são as unidades que produzem energia apenas para uso próprio. Levando em consideração que a disponibilidade de bagaço é a variável mais importante neste estudo, pois é a partir da combustão desse resíduo que ocorre a geração elétrica.

Tabela 9: Produção e utilização do bagaço nas unidades que comercializam energia elétrica

ESTADO/REGIÃO	TOTAL DA CANA MOÍDA NO PERÍODO DA SAFRA (T)	TOTAL DO BAGAÇO PRODUZIDO (T)	BAGAÇO DESTINADO PARA USO COMO COMBUSTÍVEL (T)	BAGAÇO DESTINADO A OUTROS USOS (T)	PROPORÇÃO DO BAGAÇO COMBUSTÍVEL NA CANA MOÍDA (%)	PROPORÇÃO DO BAGAÇO PARA OUTROS USOS NA CANA MOÍDA (%)
AL	11.176.047	3.144.322	2.735.917	408.406	87%	13%
PE	6.862.402	2.052.994	1.981.411	71.583	96,5%	3,5%
PB	1.045.058	292.616	288.673	3.944	98,7%	1,3%
RN	1.889.870	557.035	502.102	54.932	90,1%	9,9%
BA	907.518	270.264	263.152	7.112	97,4%	2,6%
SE	504.022	137.719	137.719	-	100%	0%
MA, PI, CE	958.714	285.534	238.260	47.274	83,4%	16,6%
AM, TO, PA	476.810	133.507	133.507	-	100%	0%
<b>TOTAL DA REGIÃO NORTE-NORDESTE</b>	<b>23.820.441</b>	<b>6.873.991</b>	<b>6.280.740</b>	<b>593.251</b>	<b>91,4%</b>	<b>8,6%</b>
<b>BRASIL</b>	<b>282.995.576</b>	<b>78.222.608</b>	<b>71.595.078</b>	<b>6.627.529</b>	<b>91,5%</b>	<b>8,5%</b>

Fonte: CONAB (2011)

Tabela 10: Produção e utilização do bagaço nas unidades que não comercializam energia elétrica

ESTADO/REGIÃO	TOTAL DA CANA MOÍDA NO PERÍODO DA SAFRA (T)	TOTAL DO BAGAÇO PRODUZIDO (T)	BAGAÇO DESTINADO PARA USO COMO COMBUSTÍVEL (T)	BAGAÇO DESTINADO A OUTROS USOS (T)
AL	13.093.712	3.812.268	3.527.927	284.341
PE	11.396.931	3.322.395	3.151.551	170.844
PB	5.196.698	1.545.897	1.305.336	240.560
RN	1.625.808	426.931	348.869	78.062
BA	1.187.029	307.248	297.291	9.957
SE	976.809	285.376	198.059	87.316
MA, PI, CE	2.419.218	701.544	675.071	26.473
AM, TO, PA	403.509	104.019	104.019	-
<b>TOTAL DA REGIÃO NORTE-NORDESTE</b>	<b>36.299.714</b>	<b>10.505.678</b>	<b>9.608.123</b>	<b>897.554</b>
<b>BRASIL</b>	<b>319.901.085</b>	<b>88.554.194</b>	<b>76.472.058</b>	<b>12.082.135</b>

Fonte: CONAB (2011)

Observando os dados apresentados, fica evidente que, na safra 2009-10, a parcela do bagaço queimado em unidades que vendem energia é menor do que o total do bagaço queimado nas demais. Estes números revelam que o processo de disseminação do agronegócio da eletricidade ainda é bastante limitado. Outra informação que decorre dos dados está na participação do bagaço destinado a outros usos entre as duas classes de unidades, que mostra que a intensidade do uso do bagaço para a queima é muito maior nas unidades vendedoras quando comparada com aquelas que cuidam apenas da autossuficiência.

Levando em consideração o destino da energia total gerada na safra entre o autoconsumo das unidades em geral e a energia despachada para terceiros nas unidades que têm comércio desse produto, serão mostradas as seguintes tabelas:

Tabela 11: Destinação do bagaço combustível das unidades que comercializam a energia elétrica

ESTADO/REGIÃO	BAGAÇO DESTINADO À GERAÇÃO PARA AUTOCONSUMO (T)	BAGAÇO DESTINADO À GERAÇÃO PARA VENDA (T)	TOTAL DO BAGAÇO QUEIMADO COMO COMBUSTÍVEL (T)	PARTICIPAÇÃO NO TOTAL	
				CONSUMO	VENDA
AL	1.879.799	856.117	2.735.917	68,71%	31,3%
PE	1.270.814	710.597	1.981.411	64,14%	35,9%
PB	138.537	150.136	288.673	47,99%	52%
RN	337.943	164.160	502.102	67,31%	32,7%
BA	162.904	100.248	263.152	61,9%	38,1%
SE	60.004	77.714	137.719	43,57%	56,4%
MA, PI, CE	201.904	36.357	238.260	84,74%	15,3%
AM, TO, PA	58.900	74.607	133.507	44,12%	55,9%
<b>TOTAL DA REGIÃO NORTE-NORDESTE</b>	<b>4.110.804</b>	<b>2.169.936</b>	<b>6.280.740</b>	<b>65,45%</b>	<b>34,55%</b>
<b>BRASIL</b>	<b>37.363.252</b>	<b>34.231.826</b>	<b>71.595.078</b>	<b>52,19%</b>	<b>47,81%</b>

Fonte: CONAB (2011)

Tabela 12: Destinação do bagaço combustível de todas as unidades

ESTADO/REGIÃO	BAGAÇO DESTINADO À GERAÇÃO PARA AUTOCONSUMO (T)	BAGAÇO DESTINADO À GERAÇÃO PARA VENDA (T)	TOTAL DO BAGAÇO QUEIMADO COMO COMBUSTÍVEL (T)	PARTICIPAÇÃO NO TOTAL	
				CONSUMO	VENDA
AL	5.407.727	856.117	6.263.844	86,33%	13,7%
PE	4.422.365	710.597	5.132.962	86,16%	13,8%
PB	1.443.873	150.136	1.594.009	90,58%	9,4%
RN	686.812	164.160	850.971	80,71%	19,3%
BA	460.194	100.248	560.442	82,11%	17,9%
SE	258.064	77.714	335.778	76,86%	23,1%
MA, PI, CE	876.974	36.357	913.331	96,02%	4%
AM, TO, PA	162.919	74.607	237.526	68,59%	31,4%
<b>TOTAL DA REGIÃO NORTE-NORDESTE</b>	<b>13.718.928</b>	<b>2.169.936</b>	<b>15.888.863</b>	<b>86,34%</b>	<b>13,66%</b>
<b>BRASIL</b>	<b>113.835.310</b>	<b>34.231.826</b>	<b>148.067.137</b>	<b>76,88%</b>	<b>23,12%</b>

Fonte: CONAB (2011)

As informações das tabelas mostram que, nas unidades, já estão gerando excedentes comercializáveis de energia. Em média, 34,55% do bagaço queimado gera a energia excedente que é vendida para terceiros. É notória a defasagem em relação à média nacional, que é de 47,81%. Quando se inclui todas as unidades visitadas e se contabiliza aquelas que não comercializam energia, produzindo apenas para autoconsumo, este volume cai para 13,66%, quase 10% a menos que o percentual nacional, que é de 23,1%. Estes percentuais refletem a enorme ineficiência atual no aproveitamento energético do bagaço da cana-de-açúcar e denota que ainda existe um imenso potencial desperdiçado de energia na exploração da atividade canavieira no Brasil.

#### 4.1.2. O DESEMPENHO NA GERAÇÃO TERMELÉTRICA

O principal propósito no estudo do desempenho na geração termelétrica, é saber a quantidade de energia elétrica que o setor estava obtendo por unidade de combustível queimado, neste caso a tonelada de bagaço na safra em análise. Esses números indicam o nível de eficiência técnica atual no aproveitamento do potencial energético do bagaço da cana. Obviamente, este resultado está diretamente relacionado com a capacidade operacional das fornalhas e caldeiras onde ele é queimado.

Tabela 13: Desempenho da geração elétrica das unidades que comercializam energia elétrica

ESTADO/REGIÃO	MÉDIA DA ENERGIA GERADA POR TONELADA DE BAGAÇO QUEIMADO NAS UNIDADES DA CLASSE (KWH)	MÉDIA DA ENERGIA AUTOCONSUMIDA POR TONELADA DE BAGAÇO QUEIMADO NAS UNIDADES DA CLASSE (KWH)	MÉDIA DA ENERGIA VENDIDA POR TONELADA DE BAGAÇO QUEIMADO NAS UNIDADES DA CLASSE (KWH)
AL	150,4	95,1	51,3
PE	157,6	86,7	69,8
PB	213,2	102,3	110,9
RN	105	70,6	34,3
BA	136,2	84,3	51,9
SE	171,9	74,1	97,8
MA, PI, CE	107,1	90,8	16,3
AM, TO, PA	177,8	78,4	99,4
<b>MÉDIA DA REGIÃO NORTE-NORDESTE</b>	<b>150,8</b>	<b>89,4</b>	<b>59,3</b>
<b>BRASIL</b>	<b>188,2</b>	<b>84,6</b>	<b>102,2</b>

Fonte: CONAB (2011)

Tabela 14: Desempenho da geração elétrica das unidades que não comercializam energia elétrica

ESTADO/REGIÃO	MÉDIA DA ENERGIA GERADA POR TONELADA DE BAGAÇO QUEIMADO NAS UNIDADES DA CLASSE (KWH)	MÉDIA DA ENERGIA AUTOCONSUMIDA POR TONELADA DE BAGAÇO QUEIMADO NAS UNIDADES DA CLASSE (KWH)
AL	87,3	83,2
PE	94,8	82,7
PB	112,3	102,9
RN	109,8	107,9
BA	99	99
SE	119,5	119,5
MA, PI, CE	87,5	87,5
AM, TO, PA	77,5	77,5
<b>MÉDIA DA REGIÃO NORTE-NORDESTE</b>	<b>94,9</b>	<b>88,1</b>
<b>BRASIL</b>	<b>85,8</b>	<b>84,6</b>

Fonte: CONAB (2011)

Comparando as tabelas 13 e 14, fica explícita uma consequência natural da presente situação: as unidades que reformam e/ou substituem seus equipamentos de geração elétrica passam a ter uma eficiência técnica na queima do bagaço muito maior que suas similares que não operaram as transformações necessárias. Esta relação é de 1,59 na região Norte-Nordeste. Esta diferença revela que existe uma enorme quantidade de energia térmica no bagaço da cana que tem sido ignorada por décadas e que somente nos anos recentes começou a ser aproveitada.

#### 4.1.3. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO CONJUNTO DAS UNIDADES DE PRODUÇÃO DE ACORDO COM O VOLUME DA CANA MOÍDA

A região Nordeste tem uma longa e consolidada tradição no setor açucareiro, particularmente nas regiões litorâneas dos estados de Alagoas, Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte. Entretanto, como as áreas aptas para a cultura da cana nessa região estão praticamente esgotadas, sua posição relativa na produção nacional vem decrescendo continuamente em face da rápida expansão da produção nos estados da região Centro-Sul. A região Norte, ao contrário, tem escassa tradição nessa lavoura e os estados do Pará e Tocantins estão surgindo, de forma ainda modesta, como nova fronteira para essa atividade.

Tabela 15: Unidades produtoras por dimensão

UNIDADE PRODUTORA POR DIMENSÃO	PARTICIPAÇÃO DAS UNIDADES QUE VENDEM ENERGIA		PARTICIPAÇÃO DAS UNIDADES QUE NÃO VENDEM ENERGIA	
	Nº	PARTICIPAÇÃO	Nº	PARTICIPAÇÃO
Moagem acima de 3 milhões de toneladas	-	-	-	-
Moagem entre 2 e 3 milhões de toneladas	1	100%	-	-
Moagem entre 1 e 2 milhões de toneladas	13	56,5%	10	43,5%
Moagem abaixo de 1 milhão de toneladas	8	13,3%	52	86,7%
<b>Todos</b>	<b>22</b>	<b>26,2%</b>	<b>62</b>	<b>73,8%</b>

Fonte: CONAB (2017)

A tabela 15 apresenta os dados, em termos da proporção das unidades desta região que já se integraram à rede geral de distribuição e despacham energia e aquelas ocupadas apenas com o autoconsumo. Os resultados apurados indicam que 22 unidades dessa região (26,2% do total em atividade) já tomaram a decisão de interligar-se à rede geral e comercializar sua energia excedente. A grande maioria delas (62 unidades), entretanto, ainda permanece operando dentro dos padrões tradicionais. Um dos motivos dessa discrepância nos resultados é que na região se observa que existe muito bagaço que poderia estar sendo queimado de forma mais eficiente e com melhor aproveitamento de seu poder calorífico, além do predomínio absoluto é de unidades do tipo pequenas (moagem entre 1 e 2 milhões de toneladas) e muito pequenas (moagem abaixo de 1 milhão de toneladas).

Nas tabelas a seguir serão exibidos os resultados sobre a capacidade de geração e o total gerado, de acordo com as classes:

Tabela 16: Capacidade e geração por classe de unidades que comercializam energia elétrica

UNIDADE PRODUTORA POR DIMENSÃO	TOTAL DA POTÊNCIA INSTALADA (KW)	TOTAL DA GERAÇÃO NA SAFRA (MWH)	TOTAL DO AUTOCONSUMO NA SAFRA (MWH)	TOTAL COMERCIALIZADO NA SAFRA (MWH)
Moagem acima de 3 milhões de toneladas	-	-	-	-
Moagem entre 2 e 3 milhões de toneladas	32.000	107.248	56.070	51.178
Moagem entre 1 e 2 milhões de toneladas	305.600	661.661	391.336	257.659
Moagem abaixo de 1 milhão de toneladas	76.200	178.016	114.053	63.512
<b>Todos</b>	<b>413.800</b>	<b>946.925</b>	<b>561.459</b>	<b>372.350</b>

Fonte: CONAB (2011)

Tabela 17: Capacidade e geração por classe de unidades que não comercializam energia elétrica

UNIDADE PRODUTORA POR DIMENSÃO	TOTAL DA POTÊNCIA INSTALADA (KW)	TOTAL DA GERAÇÃO NA SAFRA (MWH)	TOTAL DO AUTOCONSUMO NA SAFRA (MWH)
Moagem acima de 2 milhões de toneladas	-	-	-
Moagem entre 1 e 2 milhões de toneladas	111.700	349.601	311.525
Moagem abaixo de 1 milhão de toneladas	228.030	562.169	534.900
<b>Todos</b>	<b>339.730</b>	<b>911.770</b>	<b>846.425</b>

Fonte: CONAB (2011)

Tabela 18: Capacidade e geração por classe de todas unidades

UNIDADE PRODUTORA POR DIMENSÃO	TOTAL DA POTÊNCIA INSTALADA (KW)	TOTAL DA GERAÇÃO NA SAFRA (MWH)	TOTAL DO AUTOCONSUMO NA SAFRA (MWH)	TOTAL COMERCIALIZADO NA SAFRA (MWH)
Moagem acima de 3 milhões de toneladas	-	-	-	-
Moagem entre 2 e 3 milhões de toneladas	32.000	107.248	56.070	51.178
Moagem entre 1 e 2 milhões de toneladas	417.300	1.011.262	702.861	257.659
Moagem abaixo de 1 milhão de toneladas	304.230	740.186	648.953	63.512
<b>Todos</b>	<b>753.530</b>	<b>1.858.695</b>	<b>1.407.884</b>	<b>372.350</b>

Fonte: CONAB (2011)

Analisando os resultados das tabelas acima, o total apurado da potência instalada na região foi de 753,5 megawatts e representa 12,7% do total nacional. Do total da energia gerada na safra pelas unidades regionais, 50,9% são de

responsabilidade das unidades que vendem energia e 49,12% das unidades que somente geram para consumo próprio. O total gerado representa 9,3% do total nacional. Esta desproporção entre a capacidade instalada e a energia gerada se explica principalmente pelo fato de que, por diversos motivos, várias unidades reduziram, nos últimos anos, o total da cana moída e a quantidade de bagaço disponível com a conseqüente subutilização de seus equipamentos de geração elétrica.

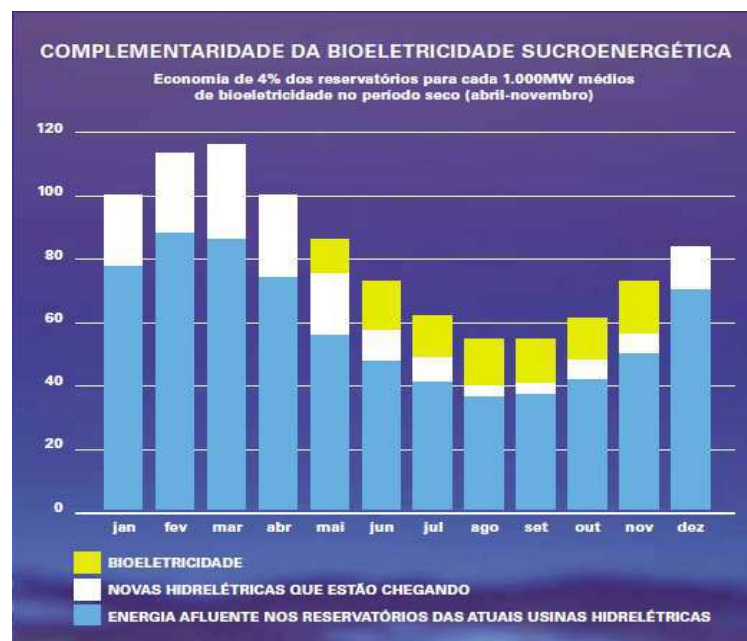
Outro fator que interfere na geração da energia elétrica na região, é o seu período de realização, o qual é o mesmo da safra. Esta temporada tem seu início em julho, agosto ou setembro, e se estende até janeiro, fevereiro ou março. Com isso, o período da entressafra pode durar até 6 meses, sem efetuar a geração de energia elétrica, já que não há bagaço suficiente e os equipamentos responsáveis pela geração estão parados para manutenções.

## 5 CONCLUSÃO

Diante de todo o estudo, fica explícita a importância do potencial elétrico da biomassa do bagaço da cana-de-açúcar na matriz elétrica brasileira, principalmente por se tratar de uma energia limpa e renovável, já que o país tem se mostrado aliado às recentes políticas de apoio a fontes de energia renováveis no mundo, focadas em reduzir as emissões de gases que causam o efeito estufa.

Além disso, a bioeletricidade representa a alternativa que possa melhor complementar o sistema hidrelétrico brasileiro. Já foi evidenciado que o Brasil possui uma matriz elétrica que tem como principal fonte a hídrica. Logo, a integração entre a bioeletricidade e a hidroeletricidade é perfeita, já que a cana produz biomassa exatamente nos meses de maior seca no Centro-Sul (abril a novembro). Sendo assim, a bioeletricidade têm a função de auxiliar na demanda de energia quando os reservatórios estiverem com níveis baixos de água. Sempre tendo a vantagem de gerar energia limpa, ao contrário das térmicas de combustíveis fósseis (gás e carvão), e estar concentrada na região de maior consumo elétrico (Sudeste), como não acontece com a energia eólica.

Gráfico 5: Complementaridade da bioeletricidade sucroenergética

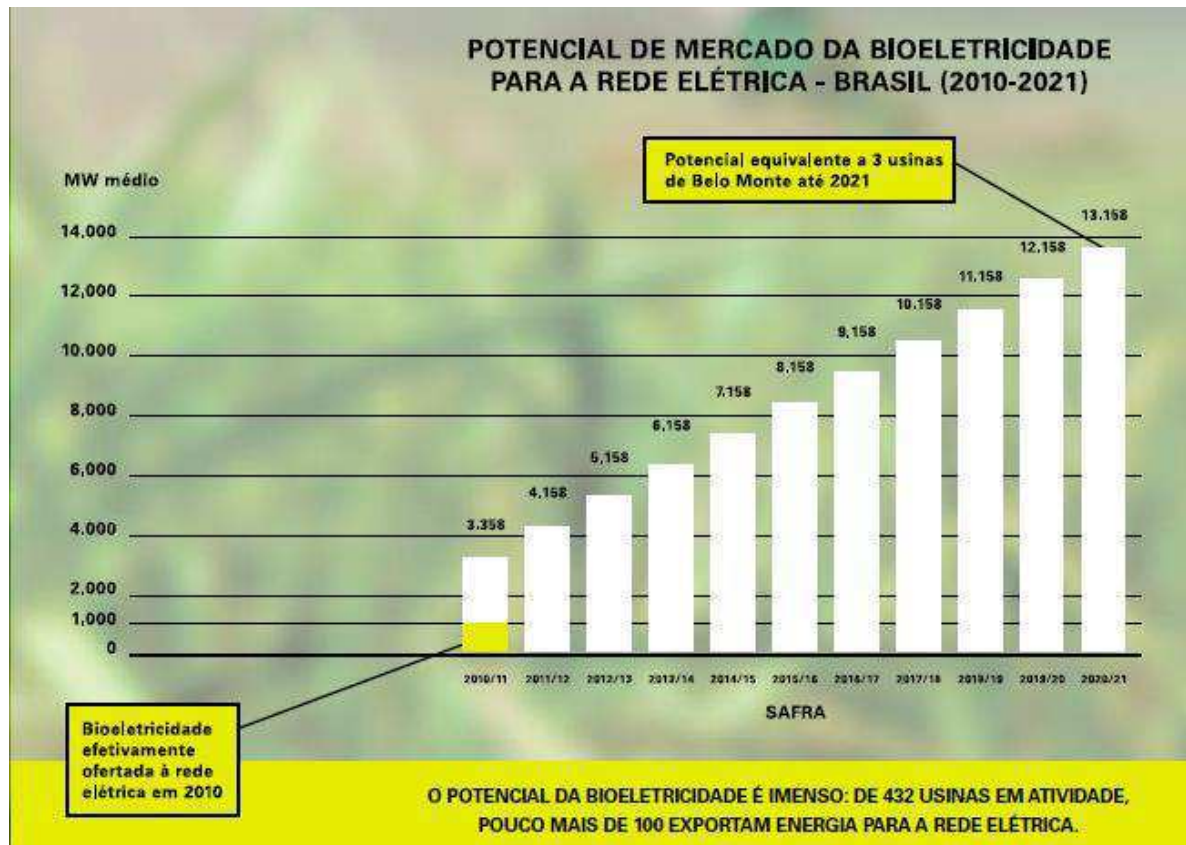


Fonte: UNICA (2011)



Porém, como foi mostrado no capítulo 4, o potencial da bioeletricidade está muito inferior do que pode oferecer. Segundo dados da UNICA, em 2010 das 432 usinas em atividade, pouco mais de 100 exportam energia para rede elétrica.

Gráfico 6: Estimativa para o mercado da bioeletricidade para a rede elétrica (2010 – 2021)



Fonte: UNICA (2011)

Então desponta uma dúvida: como podemos melhorar o potencial do bagaço da cana-de-açúcar e assim beneficiar sua contribuição para a matriz elétrica do Brasil?

São vários os aspectos que trazem uma deficiência na cogeração elétrica com a queima do bagaço, os quais nos levam a essa defasagem no que podemos gerar de bioeletricidade e o que efetivamente é ofertada à rede elétrica.

Começando pelo longo período da entressafra, ocasionado principalmente na região do Nordeste. Esta é uma limitação importante se for considerado que não é possível estocar energia elétrica e o consumo da sociedade é contínuo por todos

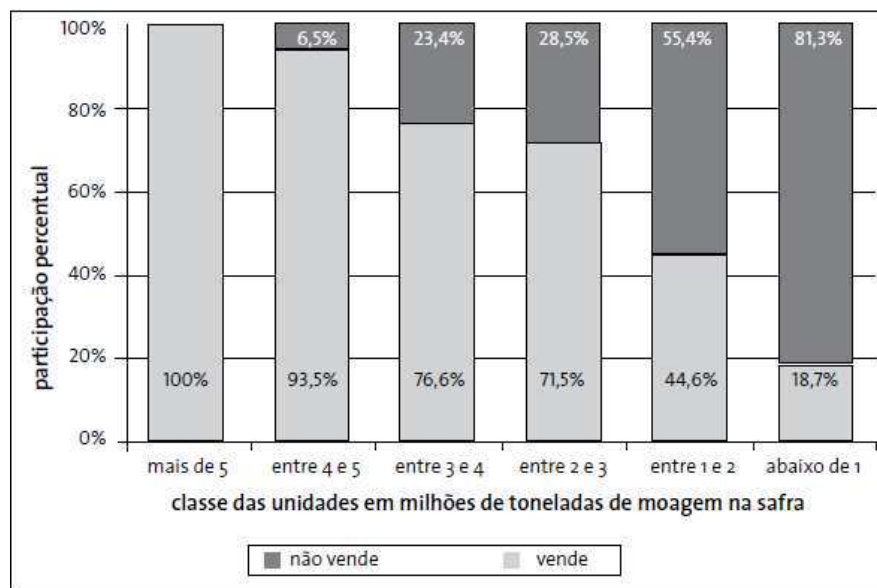
os meses do ano. Por esse motivo, o chamado fator de capacidade para esta fonte, que mede a proporção da eletricidade produzida em relação à capacidade nominal dos geradores, no período de um ano, é bastante baixo. A forma de melhorar o desempenho do setor sucroalcooleiro está na ampliação do período de geração para a época da entressafra. A única questão está no tipo de combustível que seria queimado para aproveitar o período em que as caldeiras e geradores estão ociosos e gerar continuamente. As soluções aventadas, como a estocagem do bagaço, formação de florestas cultivadas em áreas sem utilizações das próprias unidades para a produção de madeira combustível, uso de combustível líquido e/ou gasoso de fontes fósseis, etc., não têm se mostrado, até o presente momento, adequadas para superar o problema.

Outro aspecto que merece ter destaque refere-se ao uso da palha, folhas e ponteiros, que são descartados no processo da colheita. Na tradição brasileira, o corte da cana sempre foi precedido pela queima e despalhamento para facilitar o corte manual. A introdução do uso de máquinas colhedoras em substituição ao corte manual viabiliza a colheita sem a necessidade do fogo. Nesses casos, a palha, folhas e ponteiros ficam depositados no próprio local do corte e se transformam em cobertura protetora do solo e adubação orgânica. A opção proposta está em recolher a maior parte desses resíduos para transformá-los em combustíveis nas caldeiras das unidades. As informações correntes indicam que existe uma quantidade próxima a 140 quilos desse material para cada tonelada de cana pronta para o corte. Além disso, o baixo grau de umidade apresentado (em torno de 15%) e a grande concentração de fibras celulósicas permitem estimar que seu poder calorífico (medido em kcal/kg) equivale a 1,7 vezes o apresentado pelo bagaço (que tem entre 270 e 280 quilos por tonelada de cana colhida e umidade perto de 50% na saída da moenda). Estes dados indicam que o uso de toda a palha, as folhas e os ponteiros da cana nas caldeiras aumentaria em 50% o volume de combustível disponível e em 80% a quantidade de energia que poderia ser gerada. A solução atualmente mais viável seria a colheita mecanizada.

Nota-se que no Nordeste há uma grande diferença entre as unidades que vendem energia e as unidades que não vendem. Além disso, as que vendem energia possui uma discrepância em comparação com as unidades que comercializam no Sudeste. Um dos principais fatores para isto ocorrer é que a há

uma grande concentração de unidades que moem entre 1 e 2 toneladas de cana, e abaixo de 1 tonelada de cana no Nordeste, visto que a geração elétrica de excedentes comercializáveis tem um nível elevado de concentração em unidades de maior porte, como mostra o gráfico a seguir:

Gráfico 7: Distribuição percentual da geração entre classes que vendem e que não vendem energia elétrica



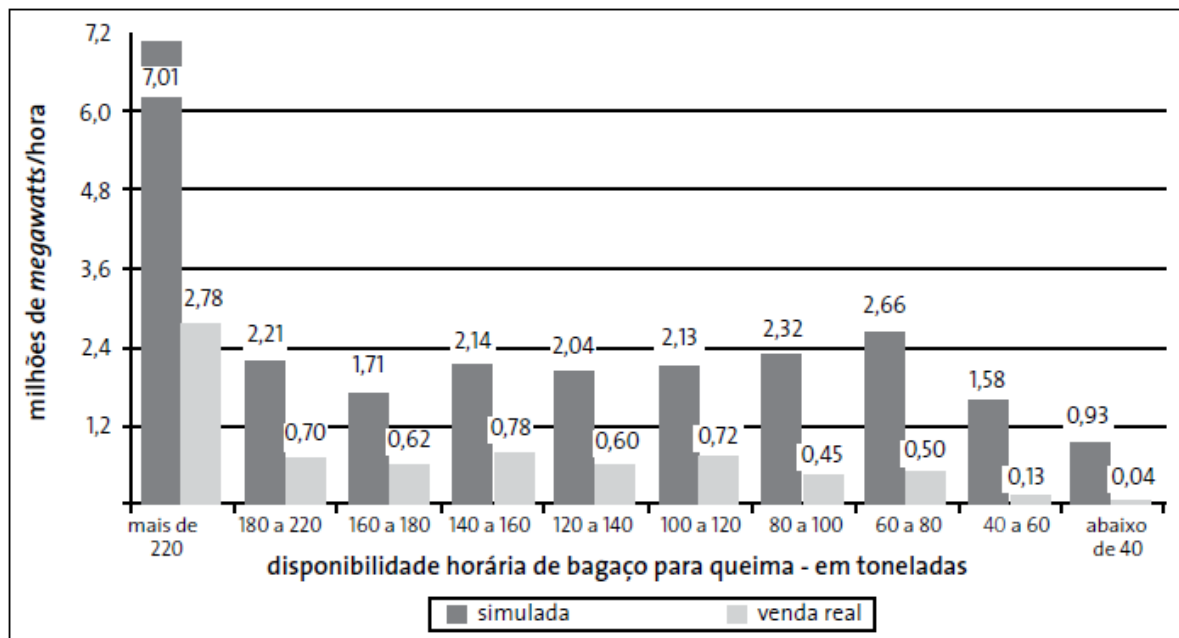
Fonte: CONAB (2011)

Outro fator para a ocorrência dessa situação é que a geração de excedentes vendáveis requer a troca dos equipamentos antigos por caldeiras, turbinas e geradores de maior capacidade, que geram muito mais energia por tonelada de bagaço queimado. Com isso, há uma necessidade da reforma dos equipamentos de produção de vapor e geração elétrica, para que ocorra o aumento da eficiência no aproveitamento do poder calorífico do bagaço e multiplicação da capacidade de geração da unidade. Caso ocorra a troca dos equipamentos de produção de vapor e geração elétrica, haverá uma melhora na eficiência da queima do bagaço e será multiplicada a quantidade disponível de energia para venda a terceiros. Nos casos em que as reformas promovem também a substituição da energia mecânica por motores elétricos para movimentar as moendas, ocorre um crescimento do consumo de energia elétrica que, contudo, é mais que compensado pela liberação de vapor que será destinado para aumentar a geração de eletricidade. De acordo com os

especialistas, essa troca promove um ganho líquido no aproveitamento energético do bagaço queimado.

O gráfico a seguir mostra o comparativo da energia excedente disponível para venda na situação atual e na situação simulada. A mensuração dessa energia excedente foi realizada pela CONAB a partir da simulação da geração que seria obtida se todas as unidades de uma mesma classe usassem uma tecnologia semelhante aos líderes e melhores de sua classe específica.

Gráfico 8: Comparativo da energia excedente disponível para venda na situação atual e na situação simulada



Fonte: CONAB (2011)

Vale ressaltar que desde 2010 não é realizado um estudo referente ao potencial do bagaço da cana-de-açúcar na região do Nordeste, mostrando assim um desinteresse por parte dos produtores e investidores nesse setor.

Muitos são os desafios para alcançarmos o real potencial que o bagaço da cana-de-açúcar pode nos garantir, porém o Brasil possui vários aspectos que possibilita esse crescimento. O país é o líder mundial na produção de açúcar, sendo o principal supridor do mercado internacional com uma parcela acima de 50% desse comércio. A posição brasileira está consolidada e as condições domésticas de

produção, em termos de clima, disponibilidade de terras férteis e custos de produção, permitem antever que a maior parte do aumento esperado no comércio mundial desse produto no futuro será provida por açúcar brasileiro. Além do mais, segundo os dados da CONAB, a produção de etanol vem aumentando a cada ano, em torno de 3,1 a 3,3 bilhões de litros. O crescimento correspondente no volume de cana-de-açúcar para a fabricação desse produto está em torno de 38,0 a 39,0 milhões de toneladas ao ano.

Com isso, a quantidade de cana-de-açúcar que será necessária para atender ao crescimento da demanda de açúcar e etanol, os números indicam volumes anuais de aumento entre 44,0 a 46,0 milhões de toneladas. A safra chegaria a 1.037,2 milhões de toneladas em 2020-21. Conseqüentemente isto significará um aumento proporcional na quantidade de bagaço, em que essa quantidade adicional de bagaço irá se somar à quantidade atual que já vem sendo queimada para gerar energia. O cenário mais provável de uso desse novo bagaço é que ele venha a ser utilizado em equipamentos modernos e gere energia excedente para ser vendida a terceiros.

## REFERÊNCIAS

BARROS, A.L.M. de, et al. Emprego e mecanização na colheita da cana-de-açúcar: diferenças regionais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL, 42., 2004. Cuiabá. **Anais...**Cuiabá: SOBER, 2004. 19p. CD-ROM.

BIODIESELBR. **Perspectivas do álcool/etanol.** Disponível em: <<http://www.biodieselbr.com.br>>. Acesso em: 14 jul. 2017.

CORRÊA NETO, V. **Análise de viabilidade da cogeração de energia elétrica em ciclo combinado com gaseificação de biomassa de cana-de-açúcar e gás natural.** Rio de Janeiro, 2001. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

COELHO, S. T. **Mecanismo para implementação da co-geração de eletricidade a partir de biomassa:** um modelo para o Estado de São Paulo. São Paulo, 1999. Tese (Doutorado) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo.

EID, F.; PINTO, S da S. **Dinâmica recente da centralização de capitais e da redução de emprego na agroindústria canavieira nordestina.** Disponível em: <[http://www.race.nucu.ie.ufrj.br/abet/3 reg/18.DOC](http://www.race.nucu.ie.ufrj.br/abet/3%20reg/18.DOC)>. Acesso em: 22 ago. 2017.

GITMAN, LAWRENCE J. **Administração financeira:** uma abordagem Gerencial. São Paulo: Pearson, 2003.

GOES, T.; MARRA, R.; SILVA, G. **Setor sucroalcooleiro no Brasil:** situação atual e perspectivas. Revista da Política Agrícola. Ano XVII, n. 2. Abr./Maio/Jun. 2008.

IZIDORO, C. **Análise Econômico-Financeira de Projetos.** Disponível em <<http://www.duplipensar.net/artigos/2008-texto/analise-economico-financeira-de-projetos.html>>. Acesso em: 08 mar. 2008.

SANTOS, Fernando Alves dos. **Análise da aplicação da biomassa da cana como fonte de energia elétrica:** usina de açúcar, etanol e bioeletricidade. ed. rev. 115 p. São Paulo, 2012.

SOUZA, Eduardo L. Leão de; Macedo, Isaias de Carvalho. **Etanol e Bioeletricidade:** a cana-de-açúcar no futuro da matriz energética. Editora Luc Projetos de Comunicação. São Paulo, 2010.

ÚNICA. União da Indústria de Cana-de-Açúcar. **Ciclo Econômico da Cana-de-Açúcar.** Disponível em: <http://www.unica.com.br/contest/show.asp?cntCode=8875C0EE-34FA-4649-A2E6-80160F1A4782>>. Acesso em: 28 ago. 2017.

UNICA. União da Indústria de Cana-de-Açúcar. **Aspectos relacionados com a velocidade do aumento da oferta e dos mercados de etanol.** Brasília, DF, outubro, 2007. Palestra proferida no Congresso Nacional por Antônio de Pádua Rodrigues.

UNICA. União da Indústria de Cana-de-Açúcar. **Cartilha da Bioeletricidade.** São Paulo, SP, 2011.

VIDAL, M.; SANTOS, J.; SANTOS, M. **Setor sucroalcooleiro no Nordeste brasileiro:** estruturação da cadeia produtiva, produção e mercado. Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural. Fortaleza, 23 a 27 de julho de 2006.

**CONAB. A Geração Termoelétrica com a Queima do Bagaço de Cana-de-Açúcar no Brasil Análise do Desempenho da Safra 2009-2010.** Técnico responsável: Ângelo Bressan Filho. Março de 2011.

**MME** – Ministério de Minas e Energia/ Empresa de pesquisa Energética, Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) 2010-2019, Brasília, 2010.

**LORA, E. E. S., NASCIMENTO, M.A.R.,** Geração Termelétrica – Planejamento, Projeto e Operação, Ed. Interciência, Vols. 1 e 2, Rio de Janeiro, 2004.

**RENK ZANINI,** Turbo Gear Unit TA – Single Stage with Horizontal Offset Shafts, 2001.

**SIEMENS,** SST-300 Steam Turbine for Economical Production of Heat and Power. Erlangen, Germany, 2003.