

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**Aproveitamento de resíduos da cadeia  
sucroalcooleira para geração de energia**

**Carla Valério Ilário**

Trabalho de Graduação apresentado ao  
Departamento de Engenharia Química da  
Universidade Federal de São Carlos

Orientador: Prof. **Janaina Fernandes Gomes**

São Carlos – SP

**2020**

## BANCA EXAMINADORA

Trabalho de Graduação apresentado no dia 14 de Dezembro de 2020 perante a seguinte banca examinadora

Orientador: Janaína Fernandes Gomes - UFSCar

Convidado: Kaio Rodrigues – UFSCar

Professor da Disciplina: Paula Rubia Ferreira Rosa, DEQ/UFSCar

A minha mãe, que foi alicerce em minha educação. Quem me incentivou, mesmo em momentos difíceis, a nunca desistir de nada e de ninguém e me mostrou que o mundo pode ser melhorado com amor, dedicação e coragem.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, pela minha vida, saúde e por me dar força e sabedoria para sempre superar as dificuldades encontradas ao longo da graduação. A minha mãe, que sempre esteve ao meu lado, pelo amor incondicional e pelo apoio ao longo de toda minha vida. Aos meus irmãos e amigos, que sempre foram suporte para o meu crescimento. A minha orientadora, Janaina Gomes, por ter me conduzido com tanta dedicação e empenho, mesmo que em condições adversas devido à pandemia. E, por fim, a UFSCar, instituição que foi essencial ao meu desenvolvimento profissional e pessoal.

## RESUMO

Muitos resíduos são gerados nos processos industriais das usinas sucroalcooleiras, o bagaço da cana-de-açúcar é um deles. Muitas vezes, sem o tratamento apropriado, acabam sendo apenas mais um resíduo com valor agregado desperdiçado e lançado ao meio ambiente. Entretanto, quando empregado corretamente nos processos industriais garantem eficiência energética - gerando energia a partir da queima do bagaço - e econômica, evitando a comercialização de energia para a unidade produtora. O objetivo desse trabalho é identificar qual a estratégia empregada pela maioria das usinas sucroalcooleiras hoje, as limitações para o aumento da oferta de excedentes de energia elétrica e apontar estratégias para superá-las. Para alcançar os objetivos do trabalho, utilizou-se como metodologia o estudo de caso de duas usinas paulistas. Evidenciou-se que as usinas estudadas empregam a estratégia de autossuficiência na geração de energia e apenas uma negocia o excedente para venda externa. Isso se deve principalmente aos custos associados à comercialização de energia, que são elevados, tanto para a compra quanto para a venda de excedentes de energia e, também, pela abundância de regulamentações e burocracias para esse comércio. Para superar os entraves e incentivar as usinas a produzirem energia para comercialização e não apenas para sua autossuficiência, seriam necessários estímulos governamentais, como menores taxas de negociação para compra e venda ou maiores recompensas a quem utiliza e produz energia limpa. Para hoje e para o futuro, novas fontes de energias renováveis vêm sendo estudadas e desenvolvidas, muitas delas estão ligadas ao setor sucroalcooleiro, além do bagaço, tem-se a torta de filtro e a vinhaça. Esse cenário favorece o país, que hoje possui uma matriz energética centralizada nos potenciais hídricos, que são finitos e sazonais.

## **ABSTRACT**

Many residues are generated in the industrial processes of the sugar and alcohol plants, sugarcane bagasse is one of them. Often, without proper treatment, they end up being just another waste with added value wasted and released into the environment. However, when used correctly in industrial processes, they guarantee energy efficiency - generating energy from the burning of bagasse - and economical, avoiding the commercialization of energy for a production unit. The objective of this work is to identify which strategy is used by most sugar and alcohol plants today, as limitations for increasing the supply of surplus electricity and directed to overcome them. To achieve the objectives of the work, use as a methodology the case study of two São Paulo plants. It was evidenced that the studied plants employ the strategy of self-sufficiency in the generation of energy and only one negotiates the surplus for external sales. This is mainly due to the costs associated with the commercialization of energy, which are high, both for the purchase and the sale of surplus energy and, also, for the overcoming of regulations and bureaucracies for this trade. To overcome the obstacles and encourage the plants to produce energy for commercialization and not only for their self-sufficiency, availability of government incentives, such as lower negotiation rates for buying and selling or greater rewards for those who use and produce clean energy. For today and for the future, new sources of reinforced renewable energy being studied and developed, many of them are linked to the sugar and alcohol sector, in addition to bagasse, we have filter cake and stillage. This scenario favors the country, which today has an energy matrix centered on water potentials, which are finite and seasonal.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Matriz energética brasileira em 2018.....	22
Figura 2.2 – Comparativo entre as matrizes energéticas mundial e brasileira.....	23
Figura 2.3 – Matriz Elétrica Brasileira 2017.....	25
Figura 2.4 – Macro fluxograma da indústria sucroalcooleira e seus resíduos.....	36
Figura 2.5 – Fluxograma da produção de energia a partir do bagaço de cana-de-açúcar.....	41
Figura 4.1 – Cana Moída Total por Safra.....	43
Figura 4.2 – Produção de Etanol por Safra.....	43
Figura 4.3 – Produção de Açúcar por Safra.....	44
Figura 4.4 – Custo médio da energia elétrica para indústrias no Brasil (R\$/MWh).....	49

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

### TABELAS

Tabela 2.1 – Países e matérias-primas mais utilizadas.....	18
Tabela 2.2 – Gasto energético na etapa agrícola da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar.....	19
Tabela 2.3 – Gasto energético na etapa industrial da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar.....	19

### QUADROS

Quadro 2.1 – Toneladas por hectare e custo de produção por hectare.....	18
Quadro 2.2 – Características das espécies de cana-de-açúcar.....	20
Quadro 2.3 – Produção de cana-de-açúcar mundial.....	26
Quadro 2.4 – Produção de açúcar e etanol - Safra 18’19.....	29
Quadro 2.5 – Capacidade instalada por estados brasileiros.....	34
Quadro 2.6 – Tipos de açúcar e suas características.....	35
Quadro 2.7 – Tipos de etanol e suas características.....	35
Quadro 4.1 – Características do Bagaço.....	45
Quadro 4.2 – Característica das Caldeiras Usina A.....	45
Quadro 4.3 – Característica das Caldeiras Usina B.....	46
Quadro 4.4 – Comparação entre as usinas estudadas.....	48
Quadro 4.5 – Composição do custo médio da energia para a indústria em 2016.....	50



## SUMÁRIO

<b>Banca Examinadora.....</b>	<b>I</b>
<b>Dedicatória.....</b>	<b>Ii</b>
<b>Agradecimentos.....</b>	<b>Iii</b>
<b>Resumo.....</b>	<b>Iv</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>V</b>
<b>Lista de Figuras.....</b>	<b>Vi</b>
<b>Lista de Tabelas e Quadros.....</b>	<b>Vii</b>
<b>1- INTRODUÇÃO.....</b>	<b>9</b>
<b>2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>12</b>
2.1- Histórico da Produção de Etanol e Açúcar.....	<b>12</b>
2.2- Matérias-Primas para a Produção de Etanol e Açúcar.....	<b>15</b>
2.3- Tipos de Cana-de-Açúcar, suas Utilizações e Matriz Energética.....	<b>20</b>
2.4- Produção da Cana-de-Açúcar.....	<b>25</b>
2.5- Produção de Etanol e Açúcar no Brasil.....	<b>29</b>
2.6- Resíduos das Cadeias Produtivas de Etanol e Açúcar e alguns Aproveitamentos.....	<b>36</b>
2.7- O Bagaço da Cana-de-Açúcar e suas Aplicações.....	<b>38</b>
<b>3- METODOLOGIA.....</b>	<b>42</b>
<b>4- RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>42</b>
<b>5- PERSPECTIVAS RELACIONADAS À INTENSIFICAÇÃO DO USO DE RESÍDUOS PARA A PRODUÇÃO DE ENERGIA.....</b>	<b>51</b>
<b>6- CONCLUSÃO.....</b>	<b>53</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>55</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O setor sucroenergético é um dos principais segmentos da economia brasileira. Sua expansão acontece em paralelo à grande utilização de recursos naturais e à geração de resíduos, assunto que tem mobilizado diversos segmentos a olharem para a correta gestão ambiental de todo o processo do setor a fim de diminuir impactos negativos à natureza. Segundo dados da União da Indústria de Cana-de-Açúcar (Unica), o Brasil é o maior produtor global de cana-de-açúcar, com cerca de 620 milhões de toneladas processadas na safra 18'19, gerando uma riqueza equivalente a US\$ 43 bilhões (UNICA, 2020), cerca de 2% do PIB brasileiro (PIB brasileiro, 2020).

Apesar da contribuição financeira que o setor agrega, ele também é responsável por impactos ambientais notáveis tanto pelo uso intensivo de recursos naturais como também pela grande geração de resíduos. Atualmente, a produção de açúcar e álcool mundial está baseada em diversas matérias primas, como a cana-de-açúcar, o milho, a aveia, o arroz, a cevada, o trigo, o sorgo e a beterraba. No Brasil, a cana-de-açúcar é a principal matéria prima empregada na fabricação desses produtos, ela possui diferentes processos de cultivo, variedades de espécie e características que são escolhidas de acordo com o produto que se deseja.

A cultura da cana-de-açúcar, introduzida no Brasil em 1532 pelos portugueses, foi fundamental para a formação econômica e a inserção do país no mercado internacional via exportações de açúcar. Esse setor é conhecido, segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), como o que mais gera resíduo (IPEA, 2018). Por isso, nas fábricas mais atuais, a produção de açúcar e etanol foi dimensionada para que a retirada de resíduo da unidade industrial fosse praticamente proporcional à geração de produto, já que, caso contrário, seria impraticável o armazenamento de todos os resíduos nos períodos de produção.

A busca por alternativas de utilização de resíduos industriais, agregando valor a eles, tornou-se incessante em todos os âmbitos das cadeias produtivas. A busca por processos de sustentabilidade e o aumento dos ganhos faz com que produtos antes considerados problemas passem a ser fonte de renda considerável para todas as empresas (CHUBA et al., 2010).

Segundo dados do Jornal da Ciência e Cultura, nos 108.706,47 km<sup>2</sup> de cana plantada no Brasil em 2015, foram produzidos mais de 30 bilhões de litros de álcool e 34 milhões de toneladas de açúcar. E, por outro lado, foram gerados de 10 a 15 litros de vinhaça para cada litro de álcool produzido, 280 kg de palha e de bagaço por tonelada de colmo de cana colhida e de 30 a 40 kg de torta de filtro por tonelada de cana moída, entre tantos outros resíduos como cinzas, águas de lavagem e melão (CIÊNCIA E CULTURA, 2016).

Segundo levantamento da CONAB, em 2016, os engenhos produziram cerca de 20 mil toneladas de torta de filtro. No processamento da planta, o montante ganha o reforço de mais de 438 bilhões de litros de vinhaça, um subproduto considerado cem vezes mais poluente do que o esgoto doméstico (CONAB, 2015).

De acordo com o Ipea, se todos os resíduos secos da produção da agroindústria da cana no Brasil fossem utilizados para a geração de energia, a potência instalada seria de 16.464 MW por ano, superior ao potencial da usina de Itaipu, que é considerada a maior geradora de energia limpa e renovável mundial. Entretanto, para viabilizar uma maior disponibilização dessa energia para a rede elétrica seria necessário vencer várias barreiras de ordem técnica, econômica e regulatória (IPEA, 2010).

O bagaço da cana possui um alto potencial para a geração de energia elétrica. Isso porque é considerado a estrutura lignocelulósica que constitui a maior fonte de carboidratos naturais do mundo, o que comprova a possibilidade de reutilização desse material para a produção de energia renovável. Em particular, as fibras do bagaço da cana contêm, como principais componentes, cerca de 40% de celulose, 35% de hemicelulose e 15% de lignina

(SIMPLICIO, 2017), sendo este último responsável pelo seu poder calórico. A celulose e a hemicelulose são as duas formas de carboidratos que mais existem na natureza e representam um potencial de reserva de energia para exploração e produção de outros produtos.

Além do potencial energético do bagaço da cana, ele também é utilizado para outros destinos. Alguns empregos que merecem destaque são matéria-prima na indústria de papel e papelão, na fabricação de aglomerados, na indústria química, como material alternativo na construção civil, como ração animal e na produção de biomassa microbiana (Santos et al, 2019).

Segundo o Jornal Cana, o valor médio da tonelada de bagaço, praticado na safra 18'19, foi de R\$ 59,22. Logo, para o setor sucroalcooleiro, a expectativa de intensificação do aproveitamento deste subproduto de grande valor comercial traria benefícios não só de natureza social, mas também econômica e ambiental (JORNAL CANA, 2020).

Nesse cenário, este trabalho traz uma visão crítica sobre o aproveitamento do bagaço como combustível para a geração de energia. Aqui, serão exploradas as práticas comumente empregadas em indústrias sucroenergéticas e serão discutidas alternativas que podem possibilitar a intensificação do uso do bagaço para comercialização de energia elétrica e não apenas para sua autossuficiência.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Histórico da Produção de Etanol e Açúcar**

Desde sua chegada no Brasil, em 1532, a cana-de-açúcar foi fundamental para a inserção do país no mercado externo. Por quase 400 anos, era extraído da cana quase que exclusivamente açúcar, enquanto que há apenas 100 anos o etanol vem sendo explorado (UDOP, 2003).

Antes do Brasil, a França se destacava em pesquisas que analisaram o uso do álcool em motores à explosão, bem como Inglaterra, Alemanha, Holanda e África do Sul. Posteriormente, em 1914, Henry Ford utilizou álcool em um Ford e em 1925 fez uma previsão que foi divulgada no *The New York Times*: o álcool seria o “combustível do futuro” (MARCOLIN, 2008).

Em meados do século XX, dada a crise financeira acentuada e a Segunda Guerra Mundial, a importação do petróleo que era o combustível com maior relevância em uso, foi dificultada, fazendo com que a produção interna de uma fonte alternativa de energia fosse impulsionada. Com a Crise do Petróleo na década de 1970, o incentivo à busca de uma nova fonte de energia foi em âmbito mundial. Nesse contexto, o Brasil, que já contava com uma estrutura canavieira para a produção do açúcar, lançou o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), que trouxe a minimização da importação de petróleo e, conseqüentemente, benefícios econômicos (MORAES, BACCHI, 2014).

Shikida (1998) divide o Proálcool em três fases: a) expansão moderada, de 1975 a 1979, com o governo investindo 75% do montante; b) expansão acelerada, de 1980 a 1985, na qual o governo era responsável por 56% dos investimentos; e c) desaceleração e crise, de 1986 a 1995, com 39% de participação do capital estatal.

Nos dois primeiros anos do Proálcool, o incentivo foi dado ao etanol anidro, para que ele fosse misturado à gasolina na proporção de 20% (MORAES, BACCHI, 2014). Em 1977, o incentivo passou a ser dado também ao etanol hidratado. Diante da resistência das montadoras em produzir veículos movidos a etanol, adotou-se, como estratégia para disseminar o uso desse último combustível, a conversão de motores à gasolina para que funcionassem com etanol hidratado. Em 1979, foi firmado um acordo entre representantes do governo responsáveis pelo Proálcool e a Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (Anfavea) para início da produção de carros movido a etanol, levando assim o programa à segunda fase (NIGRO; SZWARC, 2010).

Com a queda do preço do petróleo, o desabastecimento do etanol, a deficiência mecânica dos carros movidos a álcool e a abertura econômica, no final da década de 1980, o programa entrou em crise. A demanda pelo álcool superou a oferta interna fazendo com que se tornasse necessária a importação de etanol para atender o consumo (MORAES, BACCHI, 2014), o que afetou a confiança do consumidor.

No final do século XX, o lançamento dos carros flexfuel impulsionou novamente o etanol como combustível. Segundo os autores Nigro e Szwarc (2010), em 1992, a GM lançou o primeiro carro flex nos EUA, que possuía “sensor capacitivo para medição do teor de etanol no combustível”. O incentivo fiscal e a regulamentação do governo americano resultaram em grandes vendas dos carros flex nos EUA, que podiam utilizar a gasolina ou o etanol anidro com 15% de gasolina.

Diante da crise do Proálcool, essa tecnologia também ganhou espaço no Brasil. A inovação flex trouxe como resultado um aumento na produção da cana-de-açúcar e consequente aumento na visibilidade do setor sucroalcooleiro, principalmente na região Centro-Oeste do país (NOVA CANA, 2014).

Entretanto, o aumento do consumo do etanol dado pela inovação flex foi interrompido em 2008 com a crise financeira internacional. A estagnação na produção da cana-de-açúcar por causa do clima não favorável, os baixos investimentos no setor causados pela crise mundial, a manutenção de estabilidade artificial do preço da gasolina e a falta de uma política de médio e longo prazos para combustíveis no Brasil são alguns dos fatores que afetaram a produção de etanol no país nos últimos anos (MORAES, 2014).

Quanto ao mercado de açúcar, a vitória do Brasil, Austrália e Tailândia, importantes países produtores de açúcar, no painel aberto pelo Brasil na Organização Mundial do Comércio (OMC) sobre subsídios às exportações de açúcar branco praticados pela União Européia,

sinalizou a expansão da produção nos países competitivos, dentre os quais se destaca o Brasil (MORAES, 2007).

O açúcar proveniente da cana podia ser considerado como um produto exclusivamente agrícola e que era preponderante no comércio mundial, até o início do século XIX. Com as lutas para chegar ao fim da escravidão, o açúcar, que era um bem extremamente vinculado a esse tipo de trabalho, foi perdendo competitividade (MORAES, 2014).

O mercado estava mudando. Com os desenvolvimentos tecnológicos e as novas invenções trazidas com a Primeira Revolução Industrial, o açúcar tornava-se um produto agora industrial, o que fez com que os mercados se modernizassem e realizassem investimentos para que a produção fosse impulsionada (MORAES, 2014).

Outro fator que mudava o mercado era o surgimento de uma nova matéria prima para produção desse bem, a beterraba. O açúcar proveniente da beterraba se consolidou na França, em contrapartida ao bloqueio inglês de fornecimento do produto, imposto por Napoleão. A chegada desse novo produto estabeleceu uma concorrência entre as produções ao sul e ao norte do Equador, já que nesse período ainda era pouco produzido tanto o açúcar da cana quanto o de beterraba (MORAES, 2014).

A partir de políticas protecionistas e de auxílios governamentais, a participação do açúcar de beterraba passou, segundo Cabral (1936), de 14% em 1853 para 63% do total de açúcar mundial na virada do século. Não demorou para que a oferta desse produto excedesse a demanda.

Em âmbito nacional, a forma de implementação das tecnologias para produção açucareira tardou e não vingou devido à estrutura de poder vigente nos principais estados produtores de açúcar, que eram Pernambuco, São Paulo e Rio de Janeiro. Dessa forma, o advento das fábricas de açúcar foi considerado tão somente uma ampliação da capacidade de

produção dos antigos engenhos, com alguns processos a mais, como a centrifugação, o que tornou possível a produção de açúcar branco (RAMOS, 2007).

O fato de não conseguir modernizar a indústria açucareira fez com que o produto brasileiro perdesse competitividade no mercado mundial, o que associado à competição do açúcar de beterraba fez com que o Brasil perdesse o mercado externo ao longo do século XIX.

Dessa forma, o Brasil só voltou a ser considerado importante para o mercado externo depois de ter se consolidado um grande produtor para o mercado interno, fato que ocorreu após a crise de 1929 (RAMOS, 2007).

## **2.2. Matérias-Primas para a Produção de Etanol e Açúcar**

Atualmente, as principais matérias-primas utilizadas na produção de etanol no mundo são a cana-de-açúcar, o milho, a aveia, o arroz, a cevada, o trigo e o sorgo sacarino (EMBRAPA, 2019). Já para a produção do açúcar, destaca-se o sorgo sacarino, a beterraba e, principalmente, a cana-de-açúcar (EMBRAPA, 2019).

A cana-de-açúcar é uma planta fina de formato cilíndrico que contém folhas grandes e pode alcançar até seis metros de altura, fator que está ligado à exposição ao sol. Essa cultura é cultivada comumente em climas tropicais ou subtropicais e pode se desenvolver até em solos como o cerrado. A cana-de-açúcar produzida hoje é resultado de melhoramentos genéticos feitos através de cruzamentos de espécies. Essa planta surgiu na Nova Guiné e chegou ao Brasil por volta de 1520, junto com os portugueses em suas expansões. Desde sua chegada, por encontrar espaço propício ao seu desenvolvimento, a cana-de-açúcar passou a fazer parte da economia e a ser um dos mais importantes cultivos internos. Hoje, o país está em primeiro lugar na produção de açúcar e é o maior exportador de etanol mundial também (UNICA, 2019). Com a incessante busca por combustíveis alternativos ao petróleo, a cana-de-açúcar tem ganhado cada vez mais importância global para um desenvolvimento sustentável. Estima-se



que a produtividade média dos canaviais brasileiros é de 80 toneladas/hectare e que a cada tonelada de cana é possível produzir cerca de 90 litros de etanol (NOVA CANA, 2019).

O milho tem seus primeiros registros há pelo menos 7000 anos e foi encontrado no México. Em meados do século XV, quando os europeus voltaram para casa após estarem na América levaram consigo algumas variedades de sementes, o que fez com que, no final do século XVI, esse grão já estivesse espalhado por todos os continentes e adaptado a diversos climas diferentes. Atualmente, o milho é um dos cereais mais cultivados do mundo. No Brasil, essa cultura já era produzida pelos índios antes da chegada dos europeus. Mas após a colonização, a produção desse bem foi impulsionada por estar contido, principalmente, na dieta dos escravos e na ração de animais (NOVA CANA, 2019).

Os maiores produtores de milho são os EUA, seguidos por Brasil e Argentina. Os subprodutos do milho são matérias primas para vários outros processos além da indústria alimentícia, como, por exemplo, o processo de produção de etanol. Cada hectare de plantação de milho produz cerca de quinze toneladas do produto e cada tonelada de milho pode render até 380 litros de etanol (NOVA CANA, 2019).

A aveia, segundo Hendry e Kelly (1925), foi introduzida nas Américas pelos espanhóis. O Brasil apresenta registro de cultivo desde o século XV. É um cereal de inverno amplamente cultivado nos Estados Unidos, Canadá, Alemanha, Finlândia e Austrália. Para que pudesse se adequar ao solo e ao clima brasileiros foi necessário o desenvolvimento de variedades adaptadas (FRANCISCO et al., 2002). Esse cereal tem diversas utilizações, desde grãos para alimentação até matéria prima para produção de cosméticos e para indústria química.

O arroz é uma das culturas mais importantes a nível mundial, ultrapassada apenas pelo milho e trigo. Teve sua origem na Ásia há, pelo menos, 5000 anos. No Brasil, essa cultura foi introduzida pelos europeus em suas expansões. Estudiosos afirmam que a produtividade do arroz para produção de etanol pode ser equiparada ao rendimento da cana-de-açúcar e é

superior ao do sorgo e do trigo. São 420 litros de etanol por tonelada de arroz, contra 400 litros por tonelada de trigo, como produzido na Rússia, Canadá e Inglaterra (ALVES, 2014). Em litros, a capacidade de produção com arroz é o dobro da capacidade de produção de biodiesel com soja.

A cevada é um cereal que ocupa o quarto lugar na colheita mundial. O cultivo da cevada é datado entre 6000 a.C. e 7000 a.C., no Oriente Médio, sendo nessa época o principal cereal utilizado na alimentação humana. É uma cultura tipicamente de inverno, resistente a seca, mas com algumas exigências sobre a fertilidade do solo. A cevada apresenta uma estrutura de biomassa lignocelulósica que pode ser quebrada a partir de um pré-tratamento para se transformar em etanol (ROCHA, 2017).

O trigo é um cereal milenar proveniente do Oriente Médio que, por anos, foi amplamente utilizado na alimentação humana e animal. Novas funções foram descobertas para o trigo, como, por exemplo, a fabricação de etanol a partir de sua palha. O processo de produção do combustível a partir do trigo apresenta a vantagem de não utilizar combustíveis fósseis no processo (ROCHA, 2017).

O sorgo é o quinto cereal mais produzido no mundo, ficando atrás do trigo, arroz, milho e cevada. É de origem africana e foi introduzido no Brasil em meados do século XX. O sorgo apresenta quatro grandes variedades, são elas: granífero, sacarino, vassoura e forrageiro. Para a produção de açúcar e etanol, o sorgo utilizado é o sacarino. A diferença entre ele e os outros tipos está numa parte da planta chamada colmo. Os colmos são cheios de água e açúcar, semelhante a cana-de-açúcar, o que mostra seu potencial para a fabricação dos produtos em questão (ROCHA, 2017).

A beterraba é uma planta herbácea rica em açúcares, proveniente da Europa. Lá, a beterraba é muito utilizada para a produção de açúcar e etanol. O açúcar armazenado em suas células é separado dos outros componentes da planta por extração e depois cristalizado. Foi

inicialmente uma alternativa para substituir a cana-de-açúcar em momentos de crise e hoje é uma forte concorrente principalmente de países mais ao norte (ROCHA, 2017).

A Tabela 2.1 mostra as matérias-primas utilizadas para produção do etanol por países.

Tabela 2.1 - Países e matérias-primas mais utilizadas.

<i>Matéria-Prima</i>	<i>Países</i>
Cana-de-açúcar	Brasil, Índia, Austrália, Peru, Argentina e América Central.
Milho	EUA, Canadá.
Beterraba Açucareira	França, Alemanha, Espanha.
Mandioca (Cassava)	Tailândia
Trigo	China
Restos Florestais	Suécia.
Sorgo	China, Países Africanos, Índia.

Fonte: F.O. Licht, 2003

Todas essas matérias-primas têm potencial para serem complementares à principal que, indubitavelmente, para o cenário brasileiro, é a cana-de-açúcar. A vantagem da cana deve-se ao custo e à facilidade em quebrar suas moléculas de açúcar. Estima-se que, na Safra 19'20, a produção da cana teve um custo de R\$ 7.870,20/ha (NOVA CANA, 2019). No Quadro 2.1 abaixo, é possível ver, em média, quantas toneladas de matéria-prima são produzidas por hectare de terra e, também, qual o custo da produção por hectare.

Quadro 2.1 – Toneladas por hectare e custo de produção por hectare

<b>Produto</b>	<b>Toneladas por Hectare</b>	<b>Preço de Produção por Hectare (R\$)</b>
Milho	15	5000
Cana	80	7800
Beterraba	80	13850
Trigo	2,7	3000
Sorgo	50	1500
Cevada	3	2000

Fonte: Adaptado de Faesp Senar, Nação Agro, Unica, Fundação Orage.

No processamento de cana, alguns gastos energéticos devem ser levados em conta. Em um trabalho realizado em microdestilarias, os autores Santos & Santos (2009) investigaram a energia gasta para a produção de etanol em quilocalorias por tonelada de cana tanto para as

fases industriais quanto para as agrícolas. A Tabela 2.2 mostra os números para a etapa agrícola, enquanto que na Tabela 2.3 podem ser observadas as quantidades de energias gastas pela etapa industrial.

Tabela 2.2 - Gasto energético na etapa agrícola da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar.

Atividade	Energia consumida por tonelada de cana (kcal)
Processos agrícolas	5.869
Transportes	2.087
Fertilizantes (NPK)	25.784
Calcário	2.938
Herbicidas	3.489
Mudas	1.787
Caminhões e Tratores	20.658
Implementos	3.826
Total	66.438

Fonte: Santos & Santos (2009)

O total de energia gasta por tonelada de cana na fase agrícola foi de 66.438 kcal, sendo as atividades que demandam energias o transporte e as operações agrícolas, aplicação de herbicidas, calcários e fertilizantes para realizar o trato do solo, a movimentação das máquinas como caminhões, tratores e implementos e a confecção e plantio de mudas.

Tabela 2.3 - Gasto energético na etapa industrial da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar.

Atividade	Energia consumida por tonelada de cana (kcal)
Queima de lenha	19.433
Energia elétrica	19.074
Lubrificantes	170
Edificações	35.239
Equipamentos pesados	11.634
Equipamentos Leves	4.472
Total	90.022

Fonte: Santos & Santos (2009)

Para a etapa industrial, cerca de 90.022 kcal de energia por tonelada de cana moída foram gastas em atividades envolvendo a queima da lenha na caldeira, a energia elétrica demandada tanto pela indústria quanto pelo administrativo, a utilização de lubrificantes, a manutenção das edificações, e o uso, a aquisição e a manutenção de equipamentos.

Somando os gastos de energia dos processos agroindustriais na usina sucroalcooleira, segundo os autores Santos & Santos (2009), tem-se um gasto energético de 156.460 kcal por

tonelada de cana moída. Os autores ainda consideraram uma produção de 85 litros de etanol por tonelada de cana, número esse que geraria cerca de 383 mil kcal de energia vinda do etanol e mais cerca de 79 mil kcal proveniente do bagaço da cana-de-açúcar. O que significa que para uma tonelada de cana, seria possível realizar a produção de cerca de 462 mil kcal, uma relação entre a energia obtida e gasta, resulta num balanço energético positivo de 2,95.

### 2.3. Tipos de Cana-de-Açúcar, suas Utilizações e Matriz Energética

A cana-de-açúcar é uma gramínea cultivada nos países tropicais e subtropicais. Ela é um complexo híbrido de várias espécies, derivada principalmente da *Saccharum officinarum* e outras espécies *Saccharum*. É propagada vegetativamente pelo plantio de pedaços de colmo de cana. Os novos brotos surgem das gemas nos nós da cana, garantindo perfilhamento uniforme. No processo de melhoramento da cana, novas variedades são produzidas e testadas numa busca constante por variedades novas e melhores. Este tem sido um fator preponderante na melhoria da produtividade na indústria de cana-de-açúcar (Rein, 2013).

Algumas espécies de cana e suas características principais, segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa, são: *Saccharum officinarum*, *Saccharum spontaneum*, *Saccharum sinnensis*, *Saccharum barberi* e *Saccharum robustum*. Cada espécie tem suas particularidades e características, no Quadro 2.2 é possível observá-las.

Quadro 2.2 – Características das espécies de cana-de-açúcar

Espécie	Colmo	Teor de açúcar	Teor de fibras	Resistência
<i>Saccharum officinarum</i>	Grosso	Elevado	Baixo	Exigentes por boas condições de solo/clima; sensíveis a doenças
<i>Saccharum spontaneum</i>	Curtos e finos	Baixo	Elevado	Resistente a doenças
<i>Saccharum sinnensis</i>	Elevados e finos	Médio	Elevado	Resistência média às condições do solo/clima; vegetam em solos secos e pobres
<i>Saccharum barberi</i>	Baixos e finos	Baixo	Elevado	Resistente a doenças
<i>Saccharum robustum</i>	Altos e grossos	Muito baixo	Muito Elevado	Tolerantes à umidade; sensíveis a doenças

Fonte: Adaptado de Embrapa, 2018.

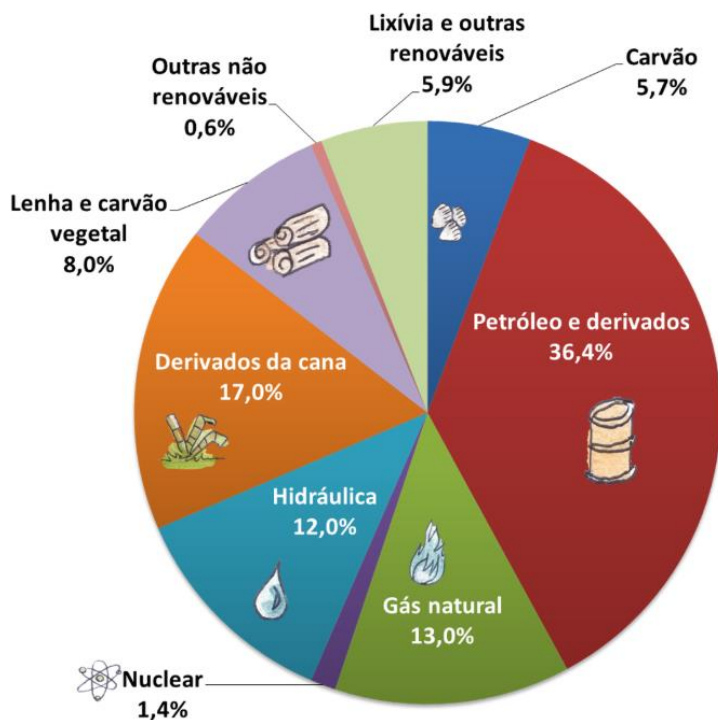
A cultura da cana-de-açúcar apresenta alta competitividade para fins energéticos e é o principal fator da expressiva expansão do etanol em relação a outros combustíveis. É possível

prever que, com a busca constante por combustíveis limpos, a utilização da cana e seus derivados aumentará ao longo do tempo, com destaque à biomassa destinada à geração de energia elétrica. O uso do etanol proveniente da cana-de-açúcar reduz a demanda de combustíveis derivados do petróleo.

Em um estudo feito por Tolmasquim, Guerreiro e Gorini (2007), foi prevista uma perspectiva para o cenário brasileiro em relação à matriz energética. Nele, a cana e seus derivados passariam a ser a segunda fonte de energia mais importante da matriz energética brasileira até 2030, o que, de fato, ocorreu até antes do previsto.

Em 2018, foi realizado o Balanço Energético Nacional (BEN). Esse estudo analisou as fontes energéticas da matriz brasileira, ou seja, fontes de energia disponíveis para movimentar meios de transporte, acender fogo e gerar eletricidade. Nele, pode-se observar que a cana-de-açúcar foi a segunda matéria prima mais utilizada como fonte de energia, abrangendo um total de 17% de toda a matriz energética. Ela ficou atrás apenas de combustíveis provenientes do petróleo e seus derivados, que abrangem cerca de 36,4% do todo, como mostra a Figura 2.1.

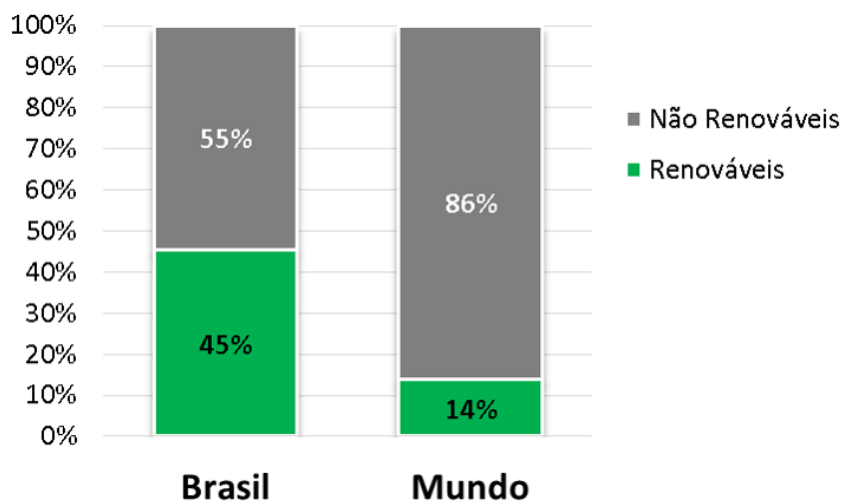
Figura 2.1 - Matriz energética brasileira em 2018



Fonte: BEN (2019)

Apesar do consumo de energia de fontes não renováveis ser maior do que o de renováveis, a contribuição de fontes renováveis à matriz energética brasileira é maior em relação à da matriz energética mundial. Somando lenha e carvão vegetal, hidráulica, derivados de cana e outras renováveis, tem-se 42,9%, mostrando que quase metade da matriz energética brasileira é proveniente de fontes renováveis. Em comparação com a matriz energética mundial, nota-se que o Brasil está muito à frente nesse quesito, como mostra a Figura 2.2.

Figura 2.2 - Comparativo entre as matrizes energéticas mundial e brasileira.



Fonte: BEN 2019

O primeiro lugar da matriz energética tanto brasileira quanto mundial continua sendo o petróleo e seus derivados. O petróleo é uma substância fóssil, oleosa e inflamável, de alto valor energético, geralmente menos densa do que a água, com cheiro característico e coloração que pode variar do incolor até o preto. Extraído em terra (onshore) ou abaixo do assoalho do mar (offshore), a prospecção e futura exploração comercial do petróleo demandam anos de preparação e grandes investimentos, que são progressivamente mais altos, conforme a localização e a forma como os reservatórios se apresentam. Por seu alto valor energético e também por ser uma fonte não renovável, o petróleo se tornou um produto estratégico para o desenvolvimento das nações no mundo, com forte influência nas políticas internas e nas relações internacionais tanto para os países que possuem reservas como para os que não possuem (ANP, 2016).

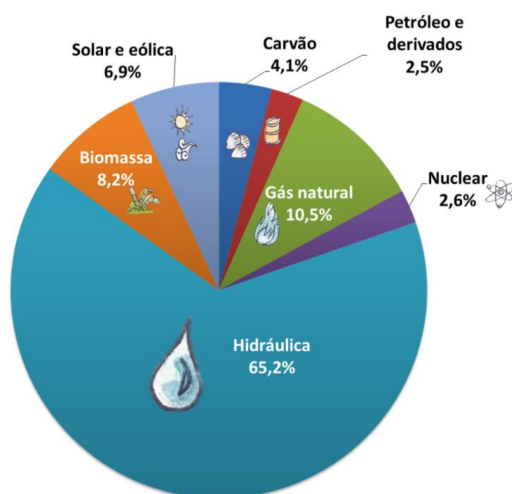
A composição química do petróleo é uma combinação complexa de hidrocarbonetos (carbono e hidrogênio), podendo conter também quantidades pequenas de nitrogênio, oxigênio, compostos de enxofre e íons metálicos (BRANCO, 2014).



Em comparação ao etanol, os combustíveis provenientes do petróleo apresentam algumas desvantagens. A gasolina, por exemplo, ao ser queimada pode levar ao acúmulo de monóxido de carbono e de outros gases que provocam o efeito estufa e tais gases induzem o aquecimento global. Além disso, é uma fonte de energia não renovável, o que significa que em algum momento essa matéria faltará e a dependência dela gerará conflitos e dificuldades. Outra desvantagem é que o preço do barril do petróleo varia muito, o que influencia diretamente no preço dos combustíveis provenientes dele. Já o etanol, por outro lado, é proveniente de uma fonte de energia renovável, reduzindo o impacto da extração de petróleo no meio ambiente. O etanol também produz uma menor pegada de carbono, ou seja, emite muito menos gases nocivos ao meio ambiente e, como consequência, contribui menos ao já problemático aquecimento global. Além disso, o etanol é solúvel em água, outro ponto que reduz o impacto ambiental caso haja algum vazamento, ao contrário do petróleo, que pode demorar décadas para se diluir em água (PENA, 2019).

Já a matriz elétrica brasileira, formada pelo conjunto de fontes disponíveis apenas para a geração de energia elétrica conta com a formação vista na Figura 2.3. Trata-se de uma matriz majoritariamente centralizada na disponibilidade hidráulica. Tal dependência, apesar de mostrar que o Brasil utiliza energias limpas em grande escala, não é o melhor cenário, pois a água é um recurso finito e sazonal, de modo que qualquer crise hídrica abalaria duplamente o país. Nesse caso, o ideal seria diversificar a matriz elétrica para que qualquer cenário consiga ser suprido por outras fontes limpas e renováveis.

Figura 2.3 – Matriz Elétrica Brasileira 2017



Fonte: BEN, 2018

#### 2.4. Produção da Cana-de-Açúcar

A cana-de-açúcar é uma das principais culturas do mundo, cultivada em mais de 100 países, e representa uma importante fonte de mão de obra no meio rural nesses países. Apesar desta difusão mundial, cerca de 80% da produção do planeta estão concentradas em dez países, como mostra a Quadro 2.3.

Quadro 2.3 - Produção de cana-de-açúcar mundial

País	Produção (1000 t)	Área (1000 ha)	Produtividade (t/ha)
Brasil	719,157	9,081	79,1
Índia	277,750	4,200	66,1
China	111,454	1,695	65,7
Tailândia	68,808	978	70,4
México	50,423	704	71,6
Paquistão	49,373	943	52,4
Filipinas	34,000	363	93,7
Austrália	31,457	405	77,6
Argentina	29,000	355	81,7
Indonésia	26,500	420	63,1
EUA	24,821	355	69,9
Colômbia	20,273	172	118,1
Guatemala	18,392	213	86,2
África do Sul	16,016	267	60,0
Egito	15,709	135	116,8
Costa Rica	3,735	56	66,9
Etiópia	2,400	19	126,9
<b>Total Mundial</b>	<b>1 686,014</b>	<b>23,832</b>	<b>57,5</b>

Fonte: FAO (2010)

Esses dados mostram que Brasil, Índia e China são detentores de uma grande parcela da produção de cana-de-açúcar mundial. Ainda assim, a distância entre o primeiro e o segundo lugar é grande, o que mostra o potencial brasileiro na produção deste bem quando comparado a outras regiões, climas e vegetações.

Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), a produção total de cana na safra 18'19 foi de 620 milhões de toneladas (CONAB, 2020). No Brasil, em 2018, cerca de 10.063.739 hectares de terra foram usados como área de plantio da cana-de-açúcar (CONAB, 2020).

A cana-de-açúcar é uma cultura semiperene, pois após o plantio, ela é cortada várias vezes antes de ser replantada. Seu ciclo produtivo é, em média, de seis anos com cinco cortes. No ciclo de produção da cana-de-açúcar, podem-se identificar as fases de preparo de solo,

plantio, tratos culturais e colheita. Cada fase tem sua importância para que a cana seja produtiva e rentável (NOVA CANA, 2017).

O preparo de solo é a etapa que busca melhorar as condições físicas e químicas do solo para garantir a brotação e o estabelecimento da cultura da cana. Como a reforma do canavial ocorre, em média, a cada cinco anos, dependendo da produtividade do talhão, é importante que o preparo de solo seja feito de maneira eficiente, já que a próxima oportunidade dessa prática agrícola levará alguns anos para acontecer. Ou seja, caso o preparo não seja feito de maneira adequada, os problemas que aparecerão poderão persistir por algum tempo. A produtividade da cana está altamente relacionada com essa etapa produtiva (NOVA CANA, 2017).

Todas as etapas do preparo do solo são importantes. As práticas que visam a correção do solo como calagem, gessagem e fosfatagem, que propiciam boas condições para o crescimento radicular, o controle de plantas daninhas, as operações de sulcação-adubação, o preparo da muda, entre outros, colaboram para o sucesso do plantio, do estabelecimento e da produtividade da cultura (EMBRAPA, 2018).

Segundo a Embrapa, o preparo do solo visa atenuar ou eliminar os fatores físicos, como compactação, adensamento e encharcamento; fatores químicos como baixo teor de nutrientes, elevados teores de alumínio, manganês e sais de sódio; e também fatores biológicos como nematóides, cupins, entre outros.

Para o plantio, é necessário um bom planejamento de área juntamente com um levantamento topográfico. Esse trabalho é conhecido como sistematização de solo. Os princípios de conservação do solo e a execução de terraços devem orientar todo o planejamento da sistematização do terreno. O plantio da cana pode ser efetuado manualmente ou mecanicamente (EMBRAPA, 2018).

Segundo a Agência Embrapa de Informação Tecnológica (AGEITEC), o plantio compreende, basicamente, quatro etapas principais: corte de mudas, distribuição no sulco, corte dos colmos em pedaços menores dentro do sulco e cobertura.

Antes de iniciar o plantio das mudas nos talhões, algumas características devem ser levadas em consideração, como fertilidade do solo, escolha de mudas saudáveis, da quantidade necessária e da época de plantio ideal (sistema de ano-e-meio, sistema de ano e plantio de inverno) e espaçamento e profundidade, que interfere favoravelmente na disponibilização de recursos como luz, água e temperatura. Com todas as escolhas feitas, o plantio ocorrerá e será a ocasião de deixar o solo criteriosamente preparado para o cultivo da cana que acontecerá nos próximos cinco anos, podendo nessa etapa ser aplicado o calcário, para controle de pragas (EMBRAPA, 2018).

A etapa de tratos culturais envolve tanto o chamado trato soca, como o trato planta. A diferença entre eles é a época em que a operação acontece. O trato planta ocorre logo após o plantio das mudas, já o trato soca é operacionalizado após a colheita, durante a rebrota da soqueira. As principais operações dessa etapa são o enleiramento de palha, o cultivo, a adubação de soqueiras e a aplicação de herbicidas (EMBRAPA, 2018).

Os cuidados com tratos culturais de um canavial devem ser permanentes, sendo o período mais crítico os primeiros 90 dias do estabelecimento, quando se encontra mais susceptível ao ataque de pragas e doenças e competições severas de plantas invasoras por água, nutrientes e luz. Assim, neste período, o controle de invasoras através de capinas manuais ou mecânicas, ou mesmo, pelo uso de herbicidas indicados à cultura, deve ser realizado periodicamente. Da mesma forma, o monitoramento do surgimento de pragas (cupins, formigas, cigarrinhas e lagartas) e doenças (raquitismo, mosaico e carvão) deve ser constante, adotando-se medidas de controle quando necessário. Estes mesmos cuidados em tratos

culturais durante a fase de estabelecimento do canavial, deverão ser realizados durante a rebrota da soqueira (EMBRAPA, 2000).

A etapa de colheita, segundo a AGEITEC, representa o final do ciclo de crescimento e maturação, atingindo o máximo de produtividade, dadas as condições de clima e solo da região onde a cana foi plantada.

Alguns fatores comprometem a qualidade do produto final, como a queima antecipada da cana, o corte tardio após a queimada, quando a cana é cortada e fica aguardando carregamento por mais de um dia e pisoteio ou destruição das soqueiras pelas máquinas agrícolas. As opções de sistema do chamado CCT (corte, carregamento e transporte) podem ser resumidas em sistema manual, onde o corte e o carregamento são feitos manualmente, sistema semimecanizado, onde o corte é manual e o carregamento é feito por carregadoras mecânicas e sistema mecanizado, onde utiliza-se cortadoras de cana e carretas de transbordo, necessitando de mão de obra especializada apenas para operação das máquinas agrícolas (NOVA CANA, 2017).

## 2.5. Produção de Etanol e Açúcar no Brasil

O Brasil é, historicamente, o maior produtor de açúcar mundial, detendo cerca de 20% da produção e 45% da exportação global. Já na produção de etanol, o Brasil se encontra atrás apenas dos Estados Unidos, ocupando a segunda posição. O Quadro 2.4 mostra a quantidade de cana moída, açúcar e etanol produzidos no Brasil na safra 18'19.

Quadro 2.4 - Produção de açúcar e etanol - Safra 18'19

Estados	Cana-de-açúcar	Açúcar	Etanol (mil m <sup>3</sup> )		
	<i>mil toneladas</i>	<i>mil toneladas</i>	Anidro	Hidratado	Total
<b>Região Centro-Sul</b>	573.125	26.510	9.141	21.812	30.953
<b>Região Norte-Nordeste</b>	47.707	2.530	775	1.374	2.150
<b>Brasil</b>	<b>620.832</b>	<b>29.040</b>	<b>9.917</b>	<b>23.186</b>	<b>33.103</b>

Fonte: UNICA, ALCOPAR, BIOSUL, SIAMIG, SINDALCOOL, SIFAE, SINDAAF, SUDES e MAPA.

A produção desses bens de consumo inicia-se após todos os processos agrícolas serem concluídos e a matéria-prima chegar na indústria. A primeira etapa industrial é a recepção da cana-de-açúcar, nessa fase é definida a quantidade e a qualidade da matéria-prima, que é pesada e analisada a fim de identificar a quantidade de Açúcares Redutores Totais (ART, glicose e frutose) da cana, um dos principais indicadores de qualidade para a produção de açúcar e etanol. Essa análise é feita a partir de amostragens aleatórias de cana, retiradas ainda do caminhão carregado, que são enviadas para o laboratório para a determinação da produtividade da matéria-prima.

A segunda etapa é o preparo da cana-de-açúcar. Quando esta chega na usina, traz consigo impurezas e resíduos. Dessa forma, após recepcionada, é necessário deixá-la pronta para a máxima extração de açúcar na forma de um caldo limpo. A princípio, a cana é descarregada por meio de um tombador em uma esteira, onde passa por um processo de limpeza grosseiro, que pode ser feito de diversas formas, mas no Brasil, normalmente é realizado com um sistema de lavagem com água para canas queimadas e colhidas inteiras ou com sistema de limpeza a seco com peneiras e vento para canas colhidas mecanicamente. Então, a cana segue na esteira, que agora conta com picadores e desfibrador que tem a função de nivelar a matéria e facilitar, a partir do rasgo e desintegração das células, a extração da matéria-prima que dará origem a outros produtos. Após essa etapa, outro procedimento de limpeza é realizado, empregando-se eletroímãs, cuja função é retirar materiais ferrosos ou magnéticos que tenham vindo com a cana e possam estragar as máquinas (NOVA CANA, 2013).

Após o preparo da cana, começa o processo de extração do caldo. Esse caldo, depois de tratado e concentrado é disponibilizado para a fábrica de açúcar ou para a destilaria, onde se produz o etanol. O processo de extração do caldo da cana consiste em uma separação física entre o caldo e o bagaço, que pode ser realizada por meio da moagem. Na moagem, o caldo é extraído por meio de fricção mecânica com a adoção de um conjunto de ternos de moenda, que

exercem uma pressão mecânica sobre a cana. O resíduo desta etapa é o bagaço, que logo após a moagem é direcionado para depósitos para, mais tarde, ser utilizado como combustível (NOVA CANA, 2013).

A próxima etapa, envolve a limpeza do caldo extraído. Este, até então, conta com impurezas que precisam ser eliminadas para que se tenha um açúcar de boa qualidade e uma produção de etanol mais eficiente. Para a eliminação desses resíduos, o caldo passa por uma separação por peneiras a fim de separar sólidos maiores que estão em suspensão. Para a remoção de partículas mais finas, há uma sequência de tratamentos físicos e químicos como aquecimento, sulfitação, calagem, flasheamento, decantação e filtração.

Depois de aquecido, caso o caldo seja destinado à produção de açúcar branco, é comum que ele passe pela etapa de sulfitação, essa operação promove o branqueamento e clarificação do produto final. Depois, a operação de calagem é realizada. Essa fase consiste na adição de cal ao caldo com a finalidade de corrigir o pH e tornar os próximos processos do tratamento do caldo mais eficientes. A etapa de flasheamento consiste em uma rápida despressurização que reduz a temperatura do caldo. Essa etapa é realizada para eliminar os gases que estão dissolvidos no caldo e que dificultam a decantação das impurezas nas próximas etapas do processo. Logo após o flasheamento, o caldo vai para o decantador com adição de polímeros e ácido fosfórico que ajudam na aglutinação e aumentam o peso das impurezas, fazendo com que elas precipitem rapidamente. Após clarificado, o caldo segue para a fábrica de açúcar ou para a destilaria. As impurezas retiradas dessa etapa são chamadas de lodo. Essa matéria é tratada para extração de açúcar que pode ter ficado retido nela e, depois desse tratamento, o resultado é um caldo filtrado, que retorna ao processo industrial, e a torta de filtro, que pode ser utilizada como fertilizante (NOVA CANA, 2013).

A próxima fase é chamada de evaporação. Nesta fase, o caldo clarificado é aquecido novamente e vai para o conjunto de evaporadores. Na produção de etanol, geralmente o caldo



passa por um conjunto simples de evaporadores, que concentrará o caldo a 18% de sólidos. Já para a produção de açúcar, o caldo passa por um conjunto de evaporadores até atingir a concentração de cerca de 65% de sólidos. Após o processo de evaporação, o caldo é chamado de xarope. Para obter o açúcar, ainda é necessário passar pela fase de cozimento, centrifugação e secagem (NOVA CANA, 2013).

Na fábrica de açúcar, o xarope passa por outro processo de limpeza e, posteriormente, segue para o cozimento. Depois do primeiro cozimento, a massa cozida é enviada para os cristalizadores e, em seguida, para a centrifugação, onde os cristais de açúcar são separados do mel. Após essa separação, o mel retorna para o segundo cozimento. Nesse processo, o mel é misturado com xarope vindo da evaporação e os processos de cristalização e centrifugação se repetem. Os produtos dessa etapa são os cristais de açúcar e o mel residual. Os cristais são levados por esteiras transportadoras e recebem uma secagem com ar quente. Após a secagem, o açúcar segue para o armazenamento.

Já no processo de produção de etanol, a próxima etapa é a fermentação. Nesta etapa acontece a conversão do ART do caldo em álcool. Esse processo é feito por meio de adição de leveduras que realizam essa transformação química, denominada fermentação. A primeira fase da fermentação é o preparo do mosto. O mosto consiste em uma mistura do caldo concentrado vindo do tratamento do caldo, do mel residual vindo da fábrica de açúcar e de água. Além do preparo do mosto, é necessário preparar o fermento. A levedura, antes de ser adicionada ao mosto, passa por um tratamento ácido para minimizar a contaminação bacteriana no fermento e, também, criar condições no ambiente para as leveduras. O mosto e a levedura são conduzidos às dornas de fermentação e são misturados de maneira proporcional. Ficam nessas dornas por cerca de sete horas e transformam-se em uma mistura de álcool hidratado, açúcar não fermentado e leveduras, chamada de vinho.

Essa mistura é levada às centrífugas, onde é separada em vinho de leveduras e leveduras, que depois são recuperadas e reaproveitadas nas próximas fermentações. Em seguida, o vinho resultante, que é composto por água e álcool, é levado para as colunas de destilação onde é separado em álcool, água, e outros compostos e impurezas (NOVA CANA, 2013).

Na destilaria, o objetivo é realizar a separação das misturas homogêneas, compostas por líquidos com diferentes pontos de ebulição. Essa etapa consiste em uma série de destilações parciais que aumentam a porcentagem de álcool nas misturas, até atingir um ponto específico de concentração, normalmente, 93% de massa de álcool etílico na massa da mistura total. No Brasil, geralmente o vinho passa por duas colunas de destilação. Na primeira coluna, o vinho é transformado em flegma, mistura mais concentrada que é conduzida à segunda coluna para a retificação. Na coluna de retificação, o líquido é concentrado para se obter as especificações do álcool etílico hidratado. Como subproduto dessa etapa, obtém-se a vinhaça, que é uma mistura de água, sais e resíduos de álcoois extraídos do vinho. Na saída das colunas de destilação, a vinhaça é condensada para ser aproveitada como fertilizante (NOVA CANA, 2013).

Atualmente, o Brasil conta com cerca de 414 usinas de açúcar e álcool. Dessas, 224 estão instaladas na região Sudeste, 79 no Centro-Oeste, 73 no Nordeste, 33 no Sul e 5 no Norte, segundo dados da Nova Cana (2019).

De acordo com a União Nacional de Bioenergia, a capacidade instalada de geração de energia a partir da biomassa da cana de açúcar no Brasil é de 170.210.435,69 kW. O Quadro 2.5 mostra a capacidade instalada por estados.

Quadro 2.5 - Capacidade instalada por estados brasileiros.

UF	Capacidade Instalada (kW)	%
AC	116.542,80	0,07
AL	7.780.715,60	4,57
AM	2.418.346,14	1,42
AP	992.216,20	0,58
BA	14.226.381,42	8,36
CE	4.433.085,10	2,60
DF	46.358,40	0,03
ES	1.953.509,53	1,15
GO	11.197.787,29	6,58
MA	4.262.922,43	2,50
MG	20.814.196,36	12,23
MS	9.285.737,39	5,46
MT	6.438.921,68	3,78
PA	23.283.556,15	13,68
PB	893.156,80	0,52
PE	4.306.316,64	2,53
PI	2.213.986	1,30
PR	19.300.654,12	11,34
RJ	8.965.880,28	5,27
RN	4.815.884,99	2,83
RO	8.318.883,60	4,89
RR	346.104,38	0,20
RS	10.611.421,13	6,23
SC	7.799.227,88	4,58
SE	3.296.559,40	1,94
SP	26.901.372,98	15,80
TO	3.037.823	1,78

Fonte: Anel – Big – Banco Informação geração (2020)

Um estudo realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em 2019 mostrou que as usinas de cana de açúcar operam com 81% de sua capacidade produtiva. Na safra 18'19, a moagem efetiva foi estimada em 750 milhões de toneladas de cana, segundo dados do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa). A moagem efetiva, entretanto, foi de cerca de 609 milhões de toneladas, gerando aproximadamente 136.100.300 KW de energia.

Os produtos gerados, açúcar e etanol, contam com diversas variações. Para o açúcar existem as variações mostradas no Quadro 2.6 abaixo.

Quadro 2.6 - Tipos de açúcar e suas características.

TIPO	CARACTERÍSTICAS	GRANULOMETRIA	COR
Açúcar VHP (Very High Polarization)	Açúcar bruto, pode ser transformado em vários tipos de açúcar para consumo. Sua umidade é bem baixa, 0,10%, ideal para exportação.	Fina	Amarelo claro
Açúcar VVHP (Very Very High Polarization)	Sua cor é mais baixa e polarização um pouco mais alta (99,6%) que o VHP. Ele é destinado a exportação e para refino, devido a sua alta polarização. Os controles de parâmetros facilitam a sua filtrabilidade.	Fina	Amarelo claro
Açúcar Refinado – Icumsa 45	Açúcar branco, fácil dissolução e comum nos supermercados. No refinamento, adiciona-se aditivos químicos como o enxofre para tornar o produto branco e saboroso. Este processo acaba removendo vitaminas e sais minerais, deixando apenas as “calorias vazias” (sem nutrientes).	Muito fina	Branco
Açúcar Cristal – IC 150	Possui cristais grandes e transparentes, difíceis de serem dissolvidos em água. Depois do cozimento, ele passa apenas por um refinamento leve, que retira “só” 90% dos sais minerais. Ele não muda de cor quando submetido a altas temperaturas e é dividido em tipo 1, 2, 3 e 4.	Fina	Transparente
Açúcar Demerara	É um dos tipos mais caros. Ele passa por um refinamento leve e não recebe nenhum aditivo químico. Por isso, seus grãos são marrom-claros e têm valores nutricionais altos, parecidos com os do açúcar mascavo.	Fina	Marrom-claro
Açúcar Mascavo	É o açúcar bruto, escuro e úmido, extraído depois do cozimento do caldo de cana. Como o açúcar mascavo não passa pela etapa de refinamento, ele conserva o cálcio, o ferro e os sais minerais.	Muito fina	Marrom/caramelo

Fonte: Adaptado de Alpha Brasil, 2016.

Já o etanol conta com as variações apresentadas no Quadro 2.7.

Quadro 2.7 - Tipos de etanol e suas características

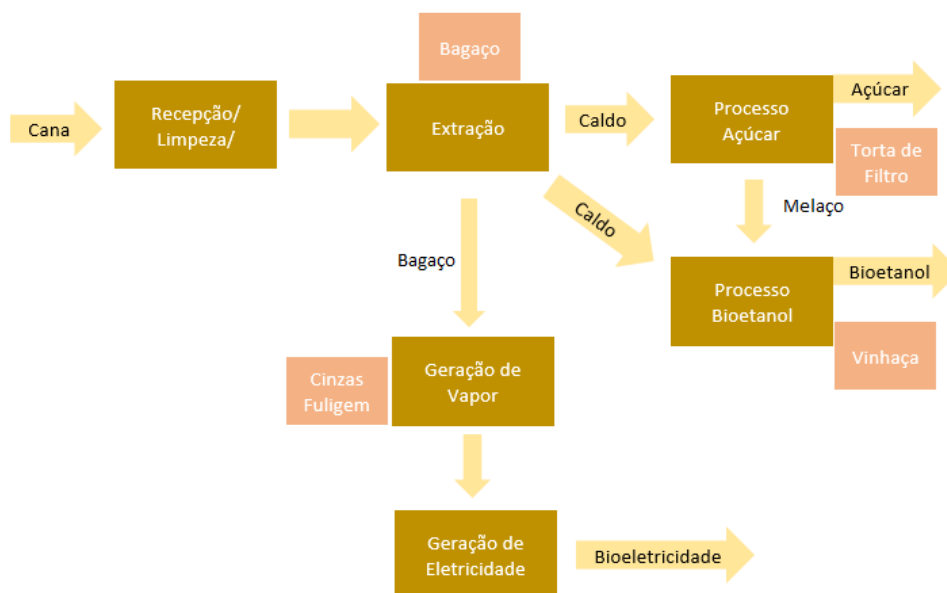
Tipo	Características
Etanol Hidratado	Etanol comum vendido nos postos, sua composição está entre 95,1% e 96% de etanol e o restante de água. Também está presente em cosméticos, produtos de limpeza, antissépticos, vinho, cerveja e outros líquidos, em graduações alcoólicas que variam de produto a produto.
Etanol Anidro	É misturado à gasolina, possui pelo menos 99,6% de graduação alcoólica. Segue o mesmo processo de fabricação que o etanol hidratado e, posteriormente, passa por processos de desidratação, é misturado à gasolina para baratear o combustível, aumentar sua octanagem e reduzir a emissão de poluentes.

Fonte: Adaptado de Alpha Brasil, 2016.

## 2.6. Resíduos das Cadeias Produtivas de Etanol e Açúcar e alguns Aproveitamentos

O setor sucroalcooleiro, como mencionado anteriormente, é conhecido por gerar grande quantidade de resíduos. A Figura 2.4 mostra um fluxograma do processo produtivo com as etapas onde são gerados os principais resíduos desse setor, o bagaço, a torta de filtro, a vinhaça, cinzas e fuligens.

Figura 2.4 – Macro fluxograma da indústria sucroalcooleira e seus resíduos



Fonte: FAPESP, (2016) adaptado

O bagaço, gerado na etapa de extração do caldo da cana, é uma alternativa competitiva para a cogeração de calor e energia elétrica. Segundo a União da Indústria de Cana de Açúcar (UNICA, 2018), uma tonelada de cana produz em média 280 Kg de bagaço e 234 Kg de palha e para produzir 1 MWh de energia são necessárias cerca de 6,5 toneladas de bagaço, a partir do sistema de cogeração. Para ilustrar, uma residência precisa, em média, de 4 MWh para abastecê-la por dois meses.

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. Essa forma do

bagaço é chamada de “bagaço *in natura*”. Outra forma de aproveitamento do bagaço pode ser obtida hidrolisando este produto. O bagaço hidrolisado é utilizado como fonte alternativa para substituição do capim em rações para confinamento, por ser fonte de proteína e energia. Algumas características analisadas no bagaço que sai do processo como resíduo são: Pol, umidade e fibra. Pol é a porcentagem em massa de sacarose aparente contida em uma amostra, umidade é a porcentagem de água presente no bagaço e fibra é a estrutura filamentosa existente no bagaço (UDOP, 2006).

A torta de filtro é resultante do processo de filtração do lodo formado na etapa de decantação do caldo. Gera-se em média quarenta quilogramas de torta de filtro por tonelada de cana. Atualmente, a torta de filtro é utilizada na lavoura ou para compostagem (FRAVET, 2010).

A vinhaça é proveniente da etapa da destilação do vinho, resultante da fermentação do melaço. O volume varia de 10 a 15 litros de vinhaça por litro de álcool produzido. A vinhaça, segundo Glória (1983) é um líquido cujo pH varia de 4 a 4,8, que conta com alta demanda bioquímica de oxigênio e emite um cheiro forte. De todos os resíduos gerados na indústria sucroalcooleira, a vinhaça é a que possui maior carga poluidora, por esse motivo não deve ser lançada nos meios hídricos e passou a ser empregada no setor agrícola como fertilizante. Ele aumenta o pH do solo, a disponibilidade de alguns íons, aumenta a capacidade de troca catiônica e a capacidade de retenção de água.

E, por fim, as cinzas geradas da queima do bagaço são dispostas em aterros ou também aplicadas no solo. Estima-se que em média 2,06 kg de cinzas são geradas a cada tonelada de cana, segundo Gurgel (2012). Já a fuligem é proveniente dos sistemas de lavagem de gases que são instalados na chaminé, em média 11,76 kg do produto são gerados a cada tonelada de cana, e é utilizada também para aplicação no solo.

No presente trabalho, será explorado com maior profundidade o aproveitamento do bagaço da cana-de-açúcar como meio para geração de energia. A próxima seção (2.7) tem informações sobre esse resíduo e alguns aspectos envolvidos na cogeração a partir da queima do bagaço.

## **2.7. O Bagaço da Cana-de-Açúcar e suas Aplicações**

O setor sucroalcooleiro, apesar de considerado um grande gerador de resíduos, reduziu drasticamente suas emissões de poluentes desde que passou a utilizar seus resíduos como insumos. Dessa forma, muitos estudos e investimentos são feitos para que o que antes era considerado inútil passe agora a ser um produto de alto valor agregado.

O bagaço, por exemplo, tem algumas aplicações na indústria. Ele pode ser usado como combustível, na fabricação de chapas de fibra usadas nas construções, na fabricação de massa de celulose como pasta de alto rendimento, na fabricação de matéria plástica ou vários solventes utilizados na indústria.

A composição física do bagaço é importante do ponto de vista energético. Os índices de umidade variam entre 45% e 50% e além de água, há fibra, que é constituída por celulose. Já sua composição química, conta com 47% de carbono, 6,5% de hidrogênio, 44% de oxigênio e 2,5% de cinzas (BARBOSA et al, 2018).

Um ponto importante sobre a produtividade do bagaço é sua estocagem e armazenamento. Sua exposição ao ar pode favorecer a fermentação, o apodrecimento e a perda de seu valor como combustível. Segundo Hubot (1977), é possível conservá-lo ao ar livre, tendo o cuidado de dar-lhe uma forma cônica ou piramidal, com inclinação mínima de 30°, formando um telhado com folhas de cana superpostas, no sentido do comprimento, como um telhado de sapé. Porém, o ideal é conservá-lo em galpão.

O poder calorífico do bagaço, que é a quantidade de calor que a combustão de 1 kg dele pode fornecer, pode ser dividido em dois valores: o poder calorífico superior, que estabelece o potencial de calor contido no combustível, representa o calor liberado pela combustão tendo toda a água resultante na fase líquida, e o poder calorífico inferior, que fornece uma ideia mais exata do calor realmente disponível, representa o calor liberado pela combustão estando toda a água resultante no estado gasoso. Segundo Paoliello (2006), o poder calorífico superior do bagaço seco é de 4600 kcal/kg, já o poder calorífico inferior é de 4250 kcal/kg.

Segundo a CETESB (1986), o bagaço de cana, como combustível, pode ser caracterizado como: 1147 kcal de energia útil contidas no vapor gerado por kg de bagaço e 1,9 kg de vapor por kg de bagaço. Alguns fatores, por outro lado, mostram alguns inconvenientes que, de acordo com a CETESB, são possíveis de tratar. O bagaço decompõe-se com o tempo, a densidade energética dele é baixa e, com uma umidade alta, a queima não é tão eficiente como a de outros combustíveis. Porém, através de prensagem, fermentação natural e aeração, num prazo de 20 dias, é possível chegar numa umidade de 20%, aumentar seis vezes a densidade energética e, então, viabilizar o armazenamento e transporte do bagaço. Após esses tratamentos, o bagaço se estabiliza e a queima nas caldeiras acontece de forma mais eficiente, quase tanto quanto o óleo combustível, o que faz com que o rendimento das caldeiras seja na ordem de 85%.

A cogeração de energia a partir do bagaço já é uma prática que vem sendo realizada pelas usinas. Para produzir o suficiente para atender o seu próprio consumo e ainda gerar um excedente para venda, são necessárias algumas melhorias, principalmente em plantas mais antigas. Segundo Walter (1994), as usinas mais antigas do país que não se modernizaram trabalham com caldeiras de baixa pressão, o que faz com que o rendimento térmico seja baixo e que a energia produzida seja suficiente apenas para acionar as moendas. Ainda segundo esse autor, a produção elétrica nas usinas de açúcar e álcool, em sistemas de cogeração que usam o

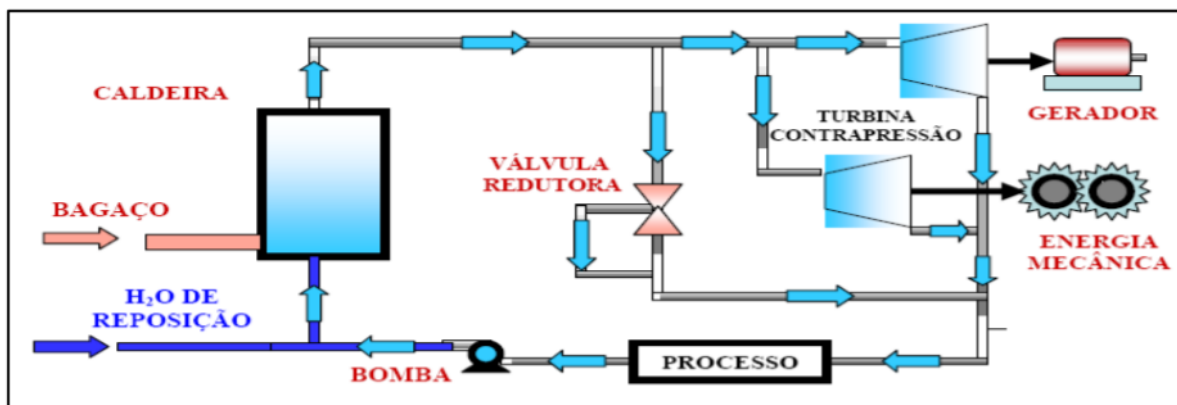


bagaço da cana como combustível, é prática tradicional desse segmento industrial em todo o mundo. O que muda, dependendo das condições particulares de cada país, é a eficiência de uso do bagaço. Em termos mundiais a experiência brasileira é importante em função do porte da atividade canavieira, mas não da eficiência com que a biomassa é empregada.

Quanto à tecnologia de cogeração, tradicionalmente as usinas utilizam ciclos de contrapressão capazes de garantir apenas o auto suprimento energético da usina. Contudo, mesmo nesse tipo de solução, algumas modificações, dentre as quais se destaca a utilização de caldeiras com maior pressão, permite atingir um nível de eficiência energético considerável, com a geração de algo em torno de 40 kWh por tonelada de cana processada (CORRÊA NETO e RAMÓN, 2002). Porém, não é apenas a instalação de caldeiras mais eficientes que conseguirá fazer com que as indústrias gerem excedente de energia. Segundo a UNICA (2015), a instalação de uma subestação e linhas de transmissão de 138 KV, além de turbos geradores capazes de receber alta pressão de vapor e temperatura que pode chegar a 530° C, o sistema de alimentação de combustível (bagaço) e água também deve acompanhar as melhorias. Na década de 90 as usinas trabalhavam com caldeiras de 42kgf/cm<sup>2</sup>. No início de 2000 algumas usinas já iniciavam a instalações de caldeiras de 65kgf/cm<sup>2</sup>, hoje tem usinas com caldeiras de até 100 kgf/cm<sup>2</sup>. A eletricidade hoje já é considerada o terceiro produto do setor sucroalcooleiro. Atualmente, aproximadamente 10% das usinas em funcionamento geram a bioeletricidade, mas esse número vem crescendo com instalação de novas e modernas unidades

A Figura 2.5 mostra um fluxograma com as etapas e maquinários envolvidos no processo de cogeração de energia nas usinas de cana-de-açúcar.

Figura 2.5 - Fluxograma da produção de energia a partir do bagaço de cana-de-açúcar.



Fonte: Pessine (2008, apud, DANTAS, 2008, p.50).

O bagaço é levado até a caldeira da usina, onde sofre combustão, o vapor gerado dentro dessas caldeiras é direcionado à uma turbina. Nela, o vapor movimenta as pás do rotor que irão gerar energia mecânica, a qual, por sua vez, é convertida em energia elétrica em um gerador acoplado ao eixo da turbina. Essa energia elétrica é finalmente lançada na rede de distribuição elétrica.

Analisando a Figura 2.5, nota-se que o bagaço é aproveitado de, pelo menos, três maneiras dentro de uma usina sucroalcooleira que conta com o processo explicado acima. A primeira maneira é apenas para o aquecimento, quando o vapor gerado passa pela válvula redutora, a segunda é o vapor gerando energia mecânica que faz o acionamento dos rotores moendas da usina e a terceira é a geração de energia elétrica que é distribuída para o funcionamento de todo o processo.

Nas usinas sucroalcooleiras, cerca de 70% do consumo de energia ocorre na forma térmica, sendo os 30% restantes, responsáveis pelo acionamento elétrico e mecânico de equipamentos e geradores, mais perdas ocorridas no trajeto (Alves, 2014).

Os investimentos necessários à implantação desse tipo de energia são confrontados com o investimento para a produção através do princípio hidráulico. No setor hidráulico é necessário cerca de US\$ 2 milhões por MW, enquanto que pelo sistema de cogeração, é estimado pela Copersucar em US\$ 1 milhão por MW.

A partir dessa revisão bibliográfica, que traz informações sobre a produção de açúcar e etanol desde o início desse mercado até os dias atuais, esse trabalho apresentará um estudo de caso realizado com 2 usinas paulistas a fim de entender e analisar as oportunidades para a expansão da geração de energia elétrica a partir do bagaço de cana.

### **3. METODOLOGIA**

Com o objetivo de analisar as limitações para o aumento da venda de energia elétrica excedente vinda do setor sucroalcooleiro, esse trabalho utilizou como método o Estudo de Caso, usando dados da literatura, visitas técnicas e entrevistas em usinas do setor, do estado de São Paulo, onde puderam ser investigadas as condições de cogeração e reutilização dos resíduos.

Para a aquisição de dados, foram realizadas, no primeiro semestre do ano de 2020, visitas nas usinas, com a finalidade de se obter informações técnicas que permitissem melhor compreender os processos e particularidades dos resíduos gerados no setor, assim como os processos realizados para alcançar tanto sustentabilidade quanto reuso de resíduos e, conseqüentemente, economia.

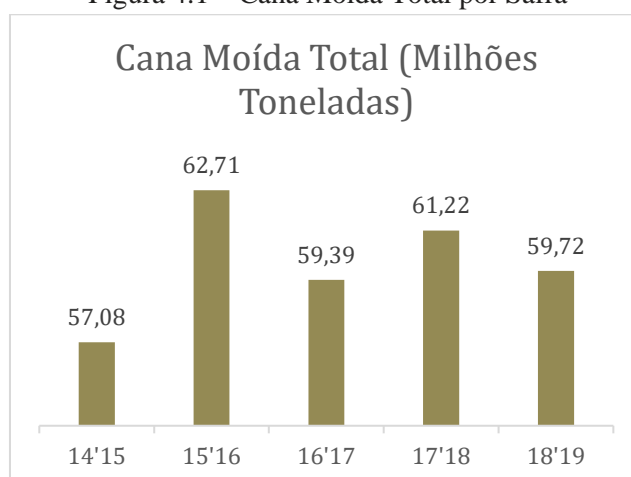
### **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

As usinas sucroalcooleiras analisadas pertencem a um grupo que possui majoritariamente unidades produtoras localizadas no estado de São Paulo. O grupo atua em todas as etapas do processo, desde o cultivo da cana, com a produção de açúcar, etanol e bioenergia, até a comercialização, logística e distribuição de combustíveis.

São 23 unidades produtoras que produzem cerca de 2,0 bilhões de litros de etanol por ano e 4,2 milhões de toneladas de açúcar. O grupo conta também com uma capacidade instalada para produzir 1GW de energia elétrica a partir do bagaço da cana, suficiente para abastecer

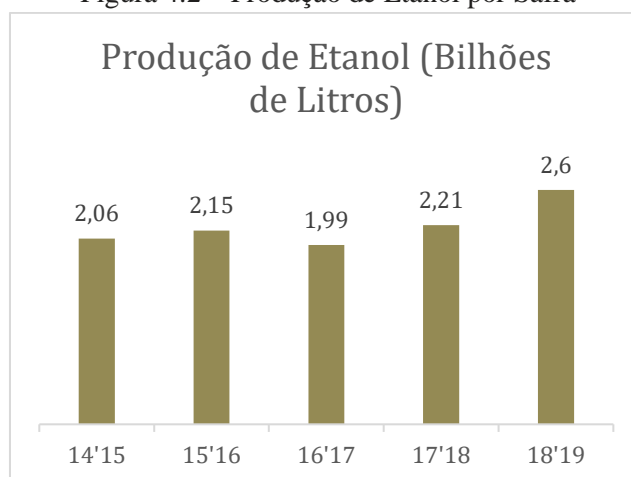
uma cidade como o Rio de Janeiro por cerca de um ano. Esse valor representa cerca de 4% da energia proveniente da biomassa da cana-de-açúcar no estado de São Paulo e 0,6% de todo o Brasil. O grupo comercializa anualmente 3,9 TWh de energia, proveniente de todo seu portfólio de energia verde (biomassa – bagaço e palha da cana-de-açúcar -, biogás e energia solar). Um histórico da moagem das usinas do grupo bem como a produção de seus principais produtos desde a safra 14'15 podem ser observados nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 abaixo.

Figura 4.1 – Cana Moída Total por Safra



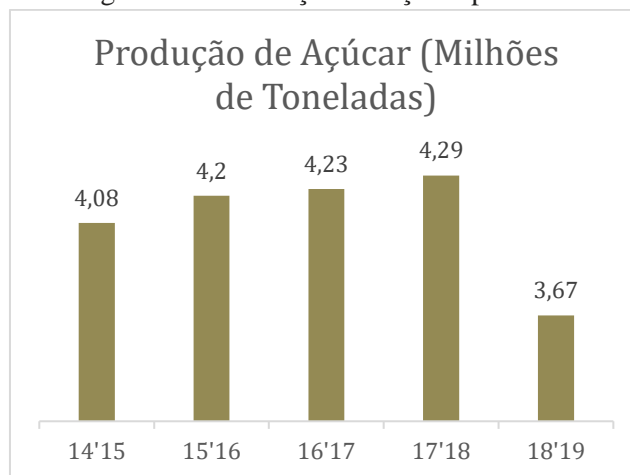
Fonte: Do Autor

Figura 4.2 – Produção de Etanol por Safra



Fonte: Do Autor

Figura 4.3 – Produção de Açúcar por Safra



Fonte: Do Autor

Entre as safras 14'15 e 18'19, foram processadas uma média de 60 milhões de toneladas de cana, sendo a safra de 15'16 a melhor para o grupo no quesito moagem. Especificamente nessa Safra, foram processadas 62,71 milhões de toneladas de cana. Nas safras analisadas a produção de etanol variou de 1,99 a 2,6 bilhões de litros e a de açúcar oscilou entre 3,67 e 4,29 milhões de tonelada. Essas produções dependem dos valores dos produtos no mercado externo e interno e, também, do foco da safra, que pode priorizar a produção de etanol ou de açúcar. Com base nos dados apresentados nas figuras, pode-se observar que o grupo estudado é de grande porte. Na Safra 18'19, por exemplo, o processamento da cana foi um total de 10% com relação a todo o Brasil neste período. O grupo possui aproximadamente 860 mil hectares de áreas agrícolas cultivadas e é líder na produção de açúcar, etanol e bioenergia do país.

A partir dessa breve introdução, o estudo de caso será voltado a duas das usinas do grupo, as quais chamaremos aqui de usina A e B.

A usina A está localizada na região noroeste do estado de São Paulo, seu potencial de moagem é de aproximadamente 7000 toneladas por dia, considerada de porte médio, e comercializa diversos produtos, como Açúcar VHP, Bagaço Hidrolisado, Bagaço in Natura, Etanol Anidro, Etanol Etílico Hidratado, Óleo Fusel e xarope.

Essa unidade produtora, na safra 19'20 moeu 1400 quilotoneladas de cana, das quais foram produzidas cerca de 59 quilotoneladas de açúcar e 69 milhões de litros de etanol. Como resíduos, foram geradas 402.461 toneladas de bagaço de cana-de-açúcar, das quais 327.227 toneladas foram consumidas pelas duas caldeiras existentes na unidade, a fim de gerar o vapor necessário para o acionamento das turbinas de preparo e moagem. O Quadro 4.1 abaixo, mostra algumas características do bagaço que saiu das moendas na usina A e foi para as caldeiras, na safra 19'20. Já o Quadro 4.2 traz informações sobre as caldeiras utilizadas no processo.

Quadro 4.1 – Características do Bagaço

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Pol Bagaço (%)	1,65
Umidade do Bagaço (%)	48,77
Fibra do Bagaço (%)	48,82

Fonte: Do Autor

Quadro 4.2 - Característica das Caldeiras Usina A

<b>Característica</b>	<b>Caldeira 1</b>	<b>Caldeira 2</b>
Pressão Nominal (kgf/cm <sup>2</sup> )	21	21
Consumo de Bagaço (ton/dia)	1006	737
Vazão Saída de Vapor Nominal (ton/h)	100	60

Fonte: Do Autor

Com essas características, durante a Safra 19'20, o processo resultou em 716.623 toneladas de vapor gerado, ou seja, aproximadamente 510 quilogramas de vapor foram gerados por tonelada de cana, o que supera algumas expectativas, já que, segundo dados da literatura, com uma tonelada de cana é possível produzir 532 quilogramas de vapor e, nesta Safra, o bagaço produzido não foi todo consumido para geração de vapor.

Na referida safra, 16653,73 MWH de energia foram gerados em um único gerador presente na unidade, o que dá um coeficiente de aproximadamente 11,9 KWH por tonelada de cana processada.

Para a Usina A, na Safra 19'20, não houve produção de energia suficiente para que o excedente fosse vendido. Na realidade, houve compra de cerca de 115 MWH de energia para que a usina funcionasse em tempo integral nos seus dias efetivos programados. Essa compra é

feita, normalmente, para a retomada dos processos da usina após a entressafra. O excedente de bagaço que foi gerado na Safra, mas não foi utilizado para cogeração devido à capacidade instalada ser inferior em relação àquela que seria necessária para cogerar energia suficiente para o funcionamento da usina, foi vendido e/ou transferido para outras unidades que possuem maior capacidade instalada. Nesse cenário, cerca de 44 mil toneladas de bagaço foram vendidas, havendo ainda uma sobra de 31 mil toneladas de bagaço para a entressafra.

Já a Usina B, localizada no interior de São Paulo, tem um potencial de moagem de 15000 toneladas de cana-de-açúcar por dia, sendo considerada de grande porte. Comercializa Açúcar VHP, Etanol Anidro, Etanol Etílico Hidratado, Bagaço Hidrolisado e Bagaço in Natura. Na Safra 19'20, moeu cerca de 2700 quilo-toneladas de cana, produzindo 238 quilo-toneladas de açúcar e cerca de 66 milhões de litros de etanol.

Na mencionada Safra, foram geradas nesta unidade cerca de 733 mil toneladas de bagaço de cana como resíduo. Além disso, foram transferidas de outra unidade do grupo aproximadamente 27 mil toneladas de bagaço a mais. O montante total foi empregado para a geração de vapor nas duas caldeiras existentes na unidade. No Quadro 4.3, há informações sobre as caldeiras utilizadas no processo.

Quadro 4.3 - Característica das Caldeiras Usina B

<b>Característica</b>	<b>Caldeira 1</b>	<b>Caldeira 2</b>
Pressão Nominal (kgf/cm <sup>2</sup> )	100	100
Consumo de Bagaço (ton/dia)	1775	2457
Vazão de Vapor Saída Nominal (ton/h)	175	225

Fonte: Do Autor

Pode-se notar, a partir do Quadro 4.3, que as caldeiras utilizadas para gerar vapor na usina B são de capacidades significativamente maiores que as da usina A.

Na referida safra, houve uma produção de vapor de 1.738.374 toneladas de vapor, ou seja, cerca de 650 quilogramas de vapor por tonelada de cana. Além disso, a Usina B conta com dois geradores, que geraram em torno de 302 mil MWH de energia. Para o funcionamento

integral da usina, foram consumidos 66 mil MWH de energia, ou seja, houve um excedente de aproximadamente 236 mil MWH de energia que, na ocasião, foi comercializado.

Para as usinas apresentadas há duas diferentes situações. A Usina A conta com um grande volume de bagaço produzido a partir da moagem da cana-de-açúcar e, mesmo utilizando toda a quantidade de bagaço que sua capacidade instalada suporta, não produz energia suficiente para a exportação, apenas o necessário para o seu funcionamento, sendo necessário a comercialização para a retomada de seus processos. Ou seja, mesmo com a sobra do bagaço, o único gerador em funcionamento e a característica das caldeiras antigas são fatores limitantes na expansão da geração, existindo necessidade de importação energética principalmente para o processo de retomada da usina após a entressafra. Apesar da sobra do bagaço nesta usina, ele ainda é aproveitado para sustentabilidade. As alternativas para esse excedente são a exportação para outra unidade utilizar nas caldeiras para geração de vapor ou, ainda, para a produção de etanol de segunda geração, dificilmente esse subproduto não é aproveitado. Já para a Usina B, todo o bagaço gerado é empregado nas caldeiras para queima e ainda é comprado bagaço de outras unidades produtoras devido à sua maior capacidade de cogeração. Dessa forma, não há excedente de bagaço e sim excedente de energia, que é comercializado. A energia produzida pela usina B é suficiente para abastecer uma cidade com 328 mil habitantes por um ano. Todas as unidades do grupo apresentado são, juntas, autossuficientes em energia, fazendo com que não haja necessidade de grandes comercializações para compra de energia do mercado.

As usinas estudadas empregam como principal estratégia a geração de energia para sua autossuficiência. Apesar de a Usina A ser de menor porte que a B, não é esse o seu fator limitante para produção de excedentes de energia. Pode-se observar que as características dos equipamentos empregados no processo são diferentes e, por isso, as indústrias não produzem energia na mesma proporção. A usina B explora seus recursos já existentes e consegue produzir um excedente de energia para venda. Mas ambas não estão, no momento, investindo em novas



tecnologias para produzir energia para comercialização. Até mesmo a usina B, que faz a comercialização, planeja a extensão da atividade sucroalcooleira, que exigirá mais energia no futuro. Portanto, a comercialização de excedente nessa usina, hoje, pode ser interpretada como parte de uma estratégia de autossuficiência no futuro. Um breve resumo dos resultados analisados nas usinas é encontrado na Quadro 4.4.

Quadro 4.4 – Comparação entre as usinas estudadas

	<b>Usina A</b>	<b>Usina B</b>
<b>Porte</b>	Pequeno (7000 tc/dia)	Médio (15000 tc/dia)
<b>Comercialização bagaço in natura</b>	Sim	Não
<b>Principal uso do bagaço</b>	Geração de Energia Elétrica	Geração de Energia Elétrica
<b>Estratégia</b>	Geração para autossuficiência presente	Geração para autossuficiência presente e futura
<b>Venda de excedente de energia elétrica</b>	Não	Sim

Fonte: Do Autor

A comercialização de energia possui alguns entraves, como diversos custos associados à venda do excedente. São eles:

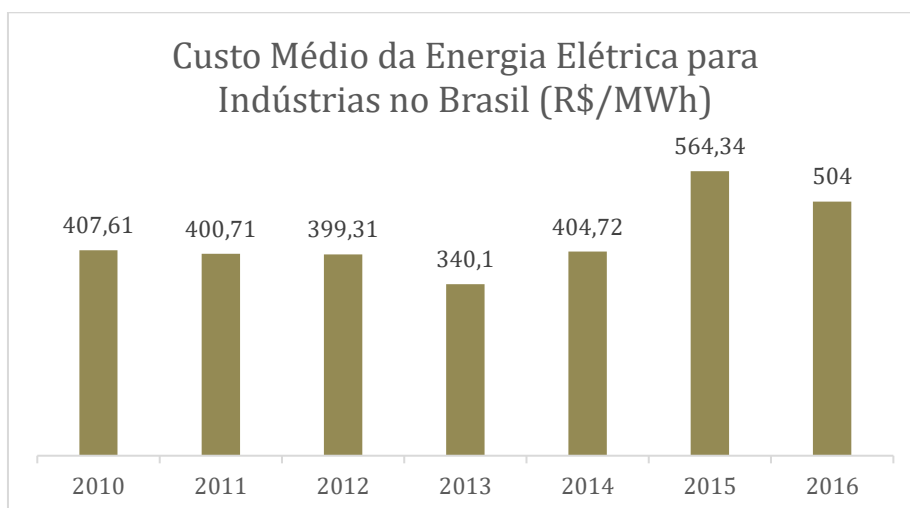
- Volatilidade no preço da energia elétrica;
- Abundância de instituições e regulamentações que geram incertezas quanto ao cumprimento do contrato de venda de energia elétrica;
- Existência de usos alternativos para o bagaço;
- Falta de liquidez no mercado de créditos de carbono;
- Dependência de localidade para baratear custos relacionados à distribuição de energia.

Por outro lado, a produção para autossuficiência nas usinas estudadas gera grandes vantagens econômicas, já que não é necessária a compra de energia de concessionárias, tendo

em vista que o preço de venda é consideravelmente mais baixo que o de compra (preço da energia, preço do transporte e custos de transação na comercialização). Para se ter ideia da economia gerada quando se produz energia para autossuficiência, segundo um estudo feito pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2017), o custo de produção médio da energia elétrica gerada apresenta um valor de R\$ 189,78 por MWh. Já para a aquisição de energia (MWh) da CPFL, o custo em 2016 foi em média de R\$ 504,00 por MWh, ou seja, significativamente maior. Deste modo, a compra de energia prejudica a competitividade das atividades principais do setor.

Abaixo, a Figura 4.4, retirada de um estudo realizado pela Federação Industrial do Rio de Janeiro (FIRJAN), instituição que estuda e promove o desenvolvimento das indústrias do estado do Rio de Janeiro, mostra o custo médio da energia para as indústrias brasileiras ao longo dos anos e, também, a composição deste custo médio em 2016. Entre os anos de 2010 e 2016, o custo de energia variou entre R\$ 340,1/MWh e R\$ 564,34/MWh. Esse valor refere-se, majoritariamente, à geração, transmissão e distribuição (GTD) de energia elétrica, como mostra o Quadro 4.5. Esses dados reforçam as vantagens econômicas associadas à autossuficiência das usinas.

Figura 4.4 - Custo médio da energia elétrica para indústrias no Brasil (R\$/MWh).



Fonte: Firjan (2016), adaptado.

Quadro 4.5 - Composição do custo médio da energia para a indústria em 2016.

Item	R\$/MWh	%
GTD	298,45	59,2
Perdas	36,95	7,3
Encargos	23,98	4,8
Bandeiras	8,75	1,7
Tributos	135,87	27
<b>Total</b>	<b>504</b>	<b>100</b>

Fonte: Firjan (2016), adaptado.

Além disso, as economias na produção sequencial de eletricidade e vapor (cogeração) tornam o custo total na produção dos dois produtos relativamente menor do que o custo de produção desses mesmos produtos separadamente. Assim, a presença de economias derivadas do processo de cogeração, que causam reduções nos custos médios, também favorece a autossuficiência das indústrias estudadas. Resumindo, há custos muito altos associados à negociação de energia elétrica, tanto para a compra quanto para a venda e poucos incentivos para essa produção, o que explica a predominância da estratégia voltada à autossuficiência das usinas. Este é o maior motivo para que as indústrias sucroalcooleiras continuem com tecnologias de menor eficiência energética, façam pouco investimento na ampliação dessas tecnologias e, conseqüentemente, deem pouca importância a excedentes de energia elétrica do setor sucroalcooleiro no mercado mundial. Dado que as tecnologias em operação permitem a autossuficiência, não há estímulos governamentais para que as usinas busquem tecnologias de maior eficiência energética para venda de excedentes.

Tal estímulo seria de grande valia para o Brasil, já que há certas necessidades que precisam ser supridas, como: (i) a descentralização da produção de energia elétrica, (ii) o constante crescimento do consumo energético associado à nossa necessidade de evolução, (iii) a falta de recursos financeiros para o investimento no Brasil, já que a produção de energia

consome 40% dos investimentos públicos, e ela é a grande responsável pelo endividamento externo do país. Além disso, também existe a necessidade de utilizar fontes alternativas de energia para diminuir a vulnerabilidade do país às crises mundiais de energia.

## **5. PERSPECTIVAS RELACIONADAS À INTENSIFICAÇÃO DO USO DE RESÍDUOS PARA A PRODUÇÃO DE ENERGIA**

Muitos novos estudos estão sendo desenvolvidos, visando o aproveitamento dos resíduos gerados em toda a cadeia sucroalcooleira (DE OLIVEIRA et al., 2016).

Alguns resíduos, devido à carga orgânica e suas propriedades, se mostram potenciais matérias-primas para a geração de energia, como, por exemplo, a vinhaça, que já vem sendo empregada, juntamente com a torta de filtro, para produção de biogás.

A vinhaça é um dos resíduos com grande capacidade de poluição nas indústrias sucroalcooleiras, isso porque é gerada em volumes significativos o que dificulta o seu tratamento adequado. Além disso, algumas usinas usam como transporte para vinhaça, caminhões. O gasto com essa logística pode chegar a R\$ 7,80 por metro cúbico de vinhaça, o que tornaria o processo significativamente mais caro. Não é o caso das usinas estudadas. Essas utilizam como meio de transporte o sistema de bombeamento. Conforme mencionado anteriormente, cada litro de etanol produzido pela destilaria gera de 10 a 15 litros de vinhaça, composta de 95% de água, 3% de sais e 2% de carga orgânica. O aproveitamento da vinhaça para a produção de biogás surge como uma alternativa viável do ponto de vista econômico e ambiental devido a três pontos: tratamento do resíduo, produção de biogás para a geração de eletricidade e ainda uso da vinhaça biodigerida como fertilizante em lavouras. A vinhaça biodigerida apresenta propriedades mais adequadas ao solo, devido à redução da carga orgânica, em relação à vinhaça *in natura*.

O outro resíduo, citado acima, que é usado juntamente com a vinhaça na biodigestão com foco em geração de biogás é a torta de filtro. Proveniente da etapa de tratamento do caldo

da cana, a torta de filtro é composta por 70% de água, 18% de matéria orgânica e 12% de outros sólidos.

Uma das empresas que estuda e desenvolve projetos para implementação de uma planta de biogás proveniente da biodigestão da vinhaça e torta de filtro é a GEO Energética. Segundo o diretor dessa empresa, Alessandro Gardemann, o processo de geração de biogás em uma usina com capacidade de moagem de 3 milhões de toneladas por safra, resulta em uma economia de cerca de 12 milhões de litros de óleo diesel, ou seja, daria para abastecer toda a frota de veículos pesados da usina, além de gerar um excedente equivalente a mais 3 milhões de litros de diesel.

Segundo a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA), estima-se que a produção de biogás pode aumentar em mais de 10% a produção energética de uma destilaria, somente com o reaproveitamento da vinhaça.

O grupo estudado nesse trabalho recentemente inaugurou uma planta de biogás, tendo como investimento inicial R\$150 milhões, com uma potência instalada de 21 MW para produção de 138.000 MWh/ano de bioeletricidade a partir do biogás dos resíduos agrícolas e industriais da usina. Essa energia é suficiente para abastecer, por exemplo, o próprio município da usina e as cidades próximas. Registros de 2016 mostram que, naquela ocasião, 96 mil MWh foram vendidos no contrato de leilão e o excedente foi negociado no mercado livre ou comercializado por meio de outros contratos, segundo a UNICA.

As perspectivas para o bagaço de cana-de-açúcar são que ele continuará sendo aplicado nas próprias usinas para seu auto abastecimento. Essa é uma técnica estudada e aplicada desde o início do século XXI que se mostra muito eficiente e viável. Para sua expansão, é necessário maior flexibilização e incentivos governamentais.

Quanto à palha da cana-de-açúcar, outro resíduo apresentado, é válido lembrar que há uma diferença significativa entre o poder calorífico dela e o do bagaço. O poder calorífico da

palha é o dobro do poder calorífico do bagaço, sendo a junção dos dois elementos uma alternativa para aumentar a geração de eletricidade. Atualmente, um dos maiores empecilhos para a associação dos dois produtos (bagaço e palha), são as características das caldeiras e geradores disponíveis na usina, que não possuem capacidade suficiente para o processamento em termos de geração, o que demandaria novos investimentos para substituição desses equipamentos.

Além disso, o bagaço e a palha da cana-de-açúcar também vêm sendo aplicado na produção do etanol de segunda geração. Por meio de um processo chamado de hidrólise, os resíduos tornam-se aproveitáveis, produzindo-se mais etanol (até 50% a mais) a partir desse caldo hidrolisado. Como cerca de metade dos açúcares e da energia da cana-de-açúcar estão presentes nas suas fibras lignocelulósicas (bagaço e palha), seria possível produzir muito mais etanol e energia com a mesma quantidade de material e área plantada. Isso coloca o E2G, como é chamado, como uma resposta a diversos desafios, como a busca por fontes energéticas renováveis que não contribuem com o aquecimento global, alternativa aos derivados do petróleo e a dependência externa que vários países têm dele, assim como a demanda crescente no mundo todo por etanol e o uso eficiente de terras (BNDES/CGEE, 2008), esse é um dos principais motivos para o incentivo à produção do E2G, pois diminuiria a ocupação de terras que poderiam ser utilizadas para cultivo de alimentos.

## **6. CONCLUSÃO**

Com o trabalho apresentado, conclui-se que a estratégia majoritariamente empregada pelas usinas do setor sucroalcooleiro é a de geração de energia para autossuficiência. Também é possível dizer, a partir do exposto, que há algumas barreiras de ordem regulatória, técnica e econômica para a geração de energia para exportação.

Para hoje e para o futuro, a eletricidade gerada a partir de resíduos da indústria sucroalcooleira apresenta inúmeras vantagens para a matriz elétrica brasileira. Conforme apresentado, essa matriz é composta majoritariamente por energia proveniente de recursos hídricos. Esse tipo de recurso, finito e sazonal, vem se tornando cada vez mais limitado, seja pela disponibilidade de áreas, pelos problemas socioambientais decorrentes destes projetos ou pelas alterações nos períodos de chuvas em decorrência das alterações climáticas. A expansão da produção de energia elétrica a partir de resíduos seria de grandes ganhos para o país, pois aumentaria a segurança energética da matriz elétrica e melhoraria os níveis de diversificação, descentralizando a produção das usinas hidrelétricas.

No que se refere aos aspectos ambientais, a cogeração elétrica traz para o setor, impactos ambientais positivos, uma vez que a energia (mecânica e elétrica) utilizada na indústria é proveniente da própria usina e a mesma comercializa o excedente, preservando os recursos hídricos, além de que as emissões de gás carbônico geradas a partir da queima da biomassa são absorvidas pela fotossíntese dos próprios canaviais, o que gera equilíbrio no sistema como um todo.

Ainda que a participação das usinas não seja tão ampla na oferta de excedentes de energia, o setor é praticamente autossuficiente em energia, sendo em média 98% de sua demanda atendida pela queima da própria biomassa e os 2% restantes atendidos com óleo diesel, álcool, gasolina e a eletricidade comprada das concessionárias.

O elevado custo associado à comercialização da energia elétrica (venda de excedentes, aquisição para consumo próprio) compõe a explicação mais provável para o foco em autossuficiência na produção de energia elétrica pelo setor sucroalcooleiro, associado à geração pouco significativa de excedentes de energia para comercialização.

O cenário nacional e mundial da energia atual mostra um desenvolvimento tanto na capacidade instalada, quanto na geração de fato. Tal situação deve-se ao aumento de consumo

de energia, tanto pelo aumento populacional, quanto pelo desenvolvimento tecnológico. Para suprir esta necessidade crescente, é necessário buscar novas fontes para a atual matriz energética. Com isso, a biomassa proveniente da cana-de-açúcar fica em evidência, em especial o bagaço, que se destaca na matriz de cogeração elétrica pela sua maior disponibilidade em relação a outras fontes de biomassa e pela a crescente expansão do setor sucroalcooleiro no país, além de que não exige custos ou tratamento prévio para a sua utilização.

Atualmente, o país não possui muitas opções de negociar energia de diferentes concessionárias, além da fonte energética do país ser centralizada (hidrelétrica), as concessionárias também são. Mas o futuro é promissor em relação a pesquisas e desenvolvimentos de novas tecnologias que farão, com os devidos incentivos, o cenário mudar e, por isso, as indústrias sucroalcooleiras estarão à frente, com mais um produto “core” além do açúcar e etanol, a energia.

## 7. REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Fontes Renováveis – Biomassa. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas\\_par2\\_cap4.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap4.pdf)>. Acesso em: 20/09/2020

ALVES, Josias Manoel. Paradigma tecnico e co-geração de energia com bagaço de cana de açúcar em Goiás.. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., 2006, Campinas. **Anais eletrônicos**. Disponível em: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022006000200021&lng=pt&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022006000200021&lng=pt&nrm=abn)>. Acesso em: 24 Nov. 2020.

BARBOSA, Bruno et al. Análise da eficiência energética do bagaço da cana na geração de vapor em uma usina sucroalcooleira. **Revista Metropolitana de Sustentabilidade**. v. 8, n. 3, 2018. Disponível em: <<https://revistaseletronicas.fmu.br/index.php/rms/article/view/1460/html>>. Acesso em: 17 Abr. 2020.

BARBOSA, Mariana. **Produção de etanol a partir da palha de cevada**. Orientador: Filomena Barreiro. 2011. 36 f. Tese (Mestre em Engenharia Química) - Escola Superior de Tecnologia e Gestão Instituto Politécnico de Bragança, 2011. Disponível em: [https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/2863/3/mariana\\_barbosa\\_MEQ\\_2011.pdf](https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/2863/3/mariana_barbosa_MEQ_2011.pdf). Acesso em: 12 ago. 2020.



BRANCO, Pércio. Petróleo. Serviços Geológico do Brasil – CPRM, 18 Ago. 2014. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/CPRM-Divulga/Petroleo-1256.html>>. Acesso em: 24 Set. 2020.

CANAL BIOENERGIA. **Produção de Biogás e o Setor Sucroenergético**. Disponível em: <<https://www.canalbioenergia.com.br/setor-sucroenergetico-e-a-producao-de-biogas/>>. Acesso em: 24 Set. 2020.

COELHO, Willian Leonardo et al. ANÁLISE DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DOS RESÍDUOS DO SETOR SUCROENERGÉTICO NO ESTADO DE MATO GROSSO EM DIFERENTES CENÁRIOS PRODUTIVOS. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 5, ed. 2, p. 332-351, 16 jun. 2016. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/46305/pdf>. Acesso em: 4 nov. 2020.

CORRÊA NETO, V. **Análise de viabilidade da co-geração 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.

DE OLIVEIRA, Sonia Valle et al. Aproveitamento de resíduos para geração de energia: ecoeficiência e sustentabilidade. **Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente**, São Paulo, 17 dez. 2016. Disponível em: <<http://engemausp.submissao.com.br/18/anais/arquivos/197.pdf>>. Acesso em: 2 nov. 2020.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética] **Balanco Energético Nacional (BEN) 2019: Ano base 2017, 2018**. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br>>. Acesso em 07 Mar. 2020.

EPE [Empresa de Pesquisa Energética] **Balanco Energético Nacional (BEN) 2020: Ano base 2018, 2019**. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br>>. Acesso em 07 Mar. 2020.

EPE. [Empresa de Pesquisa Energética]. **Análise de Conjuntura dos Biocombustíveis – Ano 2019**. Disponível em <<https://epe.gov.br>>. Acesso em 07 Mar. 2020.

FERRÃO, Paulo; WEBER, Fábio. COGERAÇÃO: UMA ABORDAGEM SOCIOECONÔMICA. **Cobenge**, Santa Catarina, 10 nov. 2009. Disponível em: <<http://www.abenge.org.br/cobenge/arquivos/18/trabalhos/GDR007.pdf>>. Acesso em: 9 out. 2020.

FRASSON, José Adriano et al. A utilização da biomassa do bagaço da cana-de-açúcar como fonte alternativa de energia elétrica. **XXX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**, São Carlos, 20 out. 2009. Disponível em: <[http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2010\\_tn\\_sto\\_123\\_796\\_16701.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2010_tn_sto_123_796_16701.pdf)>. Acesso em: 7 Set. 2020.

FRAVET, Paulo Roberto Fávero de et al. Efeito de doses de torta de filtro e modo de aplicação sobre a produtividade e qualidade tecnológica da soqueira de cana-de-açúcar. **Ciênc. agrotec.**, Lavras, v. 34, n. 3, p. 618-624, June 2010. Disponível em:

<[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-70542010000300013&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-70542010000300013&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 29 Abr. 2020.

GALDEANO, C.; GROSSMANN, M.V.E; MALI, S.; BELLO-PEREZ, L.A. Propriedades físico-químicas do amido de aveia da variedade brasileira. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 29, n. 4, p. 905-910, Dez. 2009. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/cta/v29n4/31.pdf>>. Acesso em: 10 Set. 2020.

JORNAL CANA. Quanto custa gerar energia da biomassa?. Disponível em: <<https://jornalcana.com.br/quanto-custa-gerar-energia-da-biomassa/#:~:text=Quanto%20a%20biomassa%2C%20o%20estudo,de%20oferta%20de%20energia%20el%C3%A9trica>> . Acesso em: 20 Set. 2020.

LORENZI, Bruno Rossi; ANDRADE, Thales Haddad Novaes de. O ETANOL DE SEGUNDA GERAÇÃO NO BRASIL: POLÍTICAS E REDES SOCIOTÉCNICAS. **Rev. bras. Ci. Soc.**, São Paulo, v. 34, n. 100, e3410014, 2019. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-69092019000200510&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-69092019000200510&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 15 Nov. 2020

MORAES, Marcelo; BACCHI, Mirian. ETANOL: DO INÍCIO ÀS FASES ATUAIS DE PRODUÇÃO. **Revista de Política Agrícola**, São Paulo, ano 2014, v. 23, n. 4, p. 1-22, 13 out. 2014. Disponível em: <https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/view/950>. Acesso em: 14 Abr. 2020.

MORAES, Márcia Azanha Ferraz Dias de. O mercado de trabalho da agroindústria canavieira: desafios e oportunidades. **Econ. Apl.**, Ribeirão Preto, v. 11, n. 4, p. 605-619, Dez. 2007. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-80502007000400008&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-80502007000400008&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 24 Mar. 2020.

NUNES, Elis. CANA-DE-AÇÚCAR: A PRODUÇÃO DE ETANOL E SEUS BENEFÍCIOS. Barretos, 2017. **Dissertação (Técnico) - Curso Técnico em Agronegócios do Instituto Federal de Educação Ciências e Tecnologia de São Paulo**. Disponível em: <<https://brt.ifsp.edu.br/phocadownload/userupload/213354/IFMAN170005%20CANA%20DE%20ACAR%20A%20PRODUO%20DE%20ETANOL%20E%20SEUS%20BENEFICIO%20S.pdf>>. Acesso em: 24. Out. 2020.

OLIVEIRA, L.M; SERRA, R.C.V; OLIVEIRA, K.B.M; **Balancos Energéticos da Produção de Etanol para Diferentes Matérias Primas**. Geoambiente On-line, v. 2, n. 22, p. 39-52, Jun. 2014. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/314980007\\_BALANCOS\\_ENERGETICOS\\_DA\\_PRODUCAO\\_DE\\_ETANOL\\_PARA\\_DIFERENTES\\_MATERIAS\\_PRIMAS](https://www.researchgate.net/publication/314980007_BALANCOS_ENERGETICOS_DA_PRODUCAO_DE_ETANOL_PARA_DIFERENTES_MATERIAS_PRIMAS)>. Acesso em: 10 Set. 2020.

OLIVEIRA, T.S. et al . Composição química do bagaço de cana-de-açúcar amonizado com diferentes doses de uréia e soja grão. **Arch. zootec.**, Córdoba, v. 60, n. 231, p. 625-635, Set. 2011. Disponível em: <[http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0004-05922011000300051&lng=es&nrm=iso](http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-05922011000300051&lng=es&nrm=iso)>. Acesso em 25 Mar. 2020.

PENA, Rodolfo et al. Combustíveis Fósseis. **Brasil Escola**. Março 2019. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/geografia/combustiveis-fosseis.htm>>. Acesso em: 11 Mar. 2020.

Portal Nova Cana. **A árdua caminhada do etanol**. Disponível em: <<http://www.novacana.com/n/etanol/mercado/futuro/a-ardua-caminhada-etanol-131114/>>. Acesso em: 13 Fev. 2020.

Portal Nova Cana. **Aspectos do plantio da cana-de-açúcar**. 2017. Disponível em: <<https://www.novacana.com/cana/aspectos-plantio-cana-de-acucar>>. Acesso em: 20 Fev. 2020.

Portal Nova Cana. **Como é feito o processamento da cana-de-açúcar nas usinas**. 2013. Disponível em: <<https://www.novacana.com/usina/como-e-feito-processamento-cana-de-acucar>>. Acesso em: 20 Fev. 2020.

RAMOS, Pedro. Os mercados mundiais de açúcar e a evolução da agroindústria canavieira do Brasil entre 1930 e 1980: do açúcar ao álcool para o mercado interno. **Econ. Apl.**, Ribeirão Preto, v. 11, n. 4, p. 559-585, Dez. 2007. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-80502007000400006&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-80502007000400006&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 10 Set. 2020.

ROCHA, Martha et al. Avaliação do potencial energético de resíduos agroindustriais provenientes de diferentes regiões brasileiras. **ENGEVISTA**, v. 19, n. 1, p 217-235, Jan. 2017. Disponível em: <<http://www.uff.br/engevista/seer/>>. Acesso em 23 Set. 2020.

SALLA, Diones Assis et al. Avaliação energética da produção de etanol utilizando como matéria-prima a cana-de-açúcar. **Cienc. Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 8, p. 2516-2520, Nov. 2009. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-84782009000800038&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782009000800038&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em 23 Set. 2020.

SANTIAGO, Antonio; ROSSETTO, Raffaella. **Árvore do conhecimento: Cana-de-açúcar**. Agência Embrapa de Informação Tecnológica, AGEITEC, 4 ago. 2018. Disponível em: [https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01\\_20\\_711200516716.html](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_20_711200516716.html). Acesso em: 13 Mar. 2020.

SANTOS, R. E. R e SANTOS, I. A. **Análise da viabilidade energética da produção de etanol em microdestilarias**. 4º Congresso Internacional de bioenergia. Curitiba, 2009). Disponível em: <http://www.porthuseventos.com.br/site/eventos/2009/eventobioenergia.com.br/congresso/br/tecnica/RodolfoSantos.pdf>. Acesso em 22 Ago. 2020.

SISTEMA FIRJAN. Quanto custa a energia elétrica para a indústria no Brasil?. **Estudo para o desenvolvimento do estado do Rio de Janeiro**, ed. 8, 18 ago. 2011. Disponível em: <<https://www.firjan.com.br/publicacoes/publicacoes-de-economia/default.htm>> Acesso em: 15 Set. 2020.

SISTEMA FIRJAN. Quanto custa a energia elétrica para a pequena e média indústria no Brasil? **Pesquisas e estudos socioeconômicos**, ed. 8, 20 fev. 2017. Disponível em:

<<https://www.firjan.com.br/publicacoes/publicacoes-de-economia/default.htm>> Acesso em: 15 Set. 2020.

SOARES, Paulo Augusto; ROSSELL, Carlos Eduardo. O setor sucroalcooleiro e o domínio tecnológico. **Núcleo de Análise Interdisciplinar de Políticas e Estratégia da Universidade de São Paulo**, v. 2, 2 ago. 2018. Disponível em: [https://www.novacana.com/pdf/estudos/Livro\\_Naippe\\_Vol2.pdf](https://www.novacana.com/pdf/estudos/Livro_Naippe_Vol2.pdf). Acesso em: 25 Set. 2020.

SOUZA, Zilmar José de; AZEVEDO, Paulo Furquim de. Geração de energia elétrica excedente no setor sucroalcooleiro: um estudo a partir das usinas paulistas. **Rev. Econ. Sociol. Rural**, Brasília, v. 44, n. 2, p. 179-199, Junho 2006. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-20032006000200002&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-20032006000200002&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em 24 Out. 2020.

TOWNSEND, Claudio. Recomendações técnicas para o cultivo da cana-de-açúcar forrageira em Rondônia. **Ministério da Agricultura e do Abastecimento**, [s. l.], ed. 21, p. 1-5, 4 nov. 2000. Disponível em: [https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Rt\\_21\\_000fkv0qne702wyiv80sq98yqv mh7ouy.PDF](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Rt_21_000fkv0qne702wyiv80sq98yqv mh7ouy.PDF). Acesso em: 7 jul. 2020.

UNICA – UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA DE AÇÚCAR. **Setor Sucroenergético – Histórico**. Disponível em <<https://observatoriodacana.com.br/>>. Acesso em: 20 Out. 2020.