

**CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA “PAULA SOUZA”**

**FACULDADE NILO DE STÉFANI DE JABOTICABAL - SP (Fatec-JB)**

**CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM BIOCOMBUSTÍVEIS**

**PRODUÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO BAGAÇO DE CANA: POTENCIAL DE  
GERAÇÃO DE ENERGIA E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

**KARLA BIANKA ROCHA MACHADO**

**PROF. ORIENTADOR: DR. VALCINEY GOMES DE BARROS**

**JABOTICABAL, S.P.**

**2023**

**KARLA BIANKA ROCHA MACHADO**

**PRODUÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO BAGAÇO DE CANA: POTENCIAL DE  
GERAÇÃO DE ENERGIA E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

Trabalho de graduação (TG) apresentado à Faculdade de Tecnologia Nilo De Stéfani de Jaboticabal (Fatec-JB), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Tecnóloga em Biocombustíveis

Orientador: Prof. Dr. Valciney Gomes de Barros

**JABOTICABAL, S.P.**

**2023**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

M149p Machado, Karla Bianka Rocha.

Produção de energia a partir do bagaço de cana: potencial de geração de energia eficiência energética/ Karla Bianka Rocha Machado; orientador Valciney Gomes de Barros. — Jaboticabal: Fatec Nilo de Stéfani, 2023. 28p.

Trabalho de Graduação (Tecnólogo em Biocombustíveis) - - Faculdade de Tecnologia Nilo de Stéfani - Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, 2023.

1. Biomassa. 2.Tecnologia.3. Indústria. I. Barros, Valciney G. de. II. Produção de energia a partir do bagaço de cana: potencial de geração de energia eficiência energética.

CDD 664.1

KARLA BIANKA ROCHA MACHADO

**PRODUÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO BAGAÇO DE CANA: POTENCIAL DE  
GERAÇÃO DE ENERGIA E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

Trabalho de Graduação (TG) apresentado à Faculdade de Tecnologia Nilo de Stéfani de Jaboticabal (Fatec-JB), como parte dos requisitos para a obtenção do título de Tecnólogo em **Biocombustíveis**.

**Orientador:** Prof. Dr. Valciney Gomes de Barros

**Data da apresentação e aprovação: 23/11/2023.**

**MEMBROS COMPONENTES DA BANCA EXAMINADORA**

**Presidente e Orientador: Prof. Dr. Valciney gomes de barros**

**Faculdade de Tecnologia Nilo de Stéfani de Jaboticabal (Fatec-JB)**

**Prof. Júlio César de Souza**

**Faculdade de Tecnologia Nilo de Stéfani de Jaboticabal (Fatec-JB), São Paulo - Brasil**

**Prof. Márcio Cristian Sandro dos Santos**

**Faculdade de Tecnologia Nilo de Stéfani de Jaboticabal (Fatec-JB), São Paulo - Brasil**

**Local:** Faculdade de Tecnologia Nilo de Stéfani de Jaboticabal (Fatec-JB) Jaboticabal – SP –  
Brasil

*Dedico esse estudo aos meus pais, pois, são de grande importância na minha vida e contribuíram imensamente para minha formação.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida e por ter me dado coragem durante toda esta caminhada, Ele que me ouviu nos momentos difíceis, me confortou, e me deu forças para chegar onde eu estou.

Agradeço também ao meus pais, por viverem e embarcarem junto comigo nos meus sonhos. Obrigada por não medirem esforços para me ajudar a construir um futuro melhor. Por serem meu porto seguro, pela compreensão e por compartilharem todos os momentos bons e difíceis. Eu amo e admiro muitos vocês!

Aos meus amigos, David, Diogo, Larissa e Natacha agradeço pela oportunidade de ter a companhia de vocês durante essa jornada, com certeza a faculdade foi mais leve, por terem vocês comigo e fizeram os meus dias mais felizes.

Ao professor e Orientador Valciney pela dedicação de grandes ensinamentos, profissionalismo e comprometimento.

À banca avaliadora, professores da Fatec JB, funcionários, por compartilharem seus ensinamentos, suas experiências e por serem parte desse crescimento.

Enfim, agradeço de modo geral a todos que contribuíram de forma direta ou indiretamente, para que eu alcançasse mais essa etapa da minha vida.

**MUITO OBRIGADA...**

**MACHADO, Karla Bianka Rocha. Produção de energia a partir do bagaço de cana:  
potencial de geração de energia e eficiência energética**

Trabalho de Graduação. Centro Estadual de Educação Tecnológica “Paula Souza”. Faculdade de Tecnologia de Jaboticabal. 28p. 2023.

**RESUMO**

O bagaço de cana-de-açúcar se destaca na geração de energia renovável, devido à sua alta densidade energética e ampla disponibilidade nas usinas sucroalcooleiras. A otimização da eficiência energética a partir do bagaço tem sido uma meta central na indústria sucroalcooleira. No presente estudo, por meio de uma revisão bibliográfica, avaliou-se os avanços e as perspectivas do setor em relação à relevância do bagaço e outras fontes de biomassa como suprimento energético. Os desafios enfrentados para maximizar a eficiência energética a partir do bagaço, e os benefícios ambientais, econômicos e energéticos também foram observados. Os estudos indicam que a melhoria da eficiência requer investimentos em tecnologia, infraestrutura e pesquisa, bem como a implementação de políticas governamentais consistentes. Entre os desafios estão o aprimoramento do processamento do bagaço para extrair o máximo de energia. Adicionalmente, é essencial implementar a queima controlada do bagaço de forma a prevenir emissões poluentes capazes de prejudicar a qualidade do ar e a saúde humana. A otimização do processo é fundamental, uma vez que o consumo excessivo de bagaço pode levar a problemas operacionais, como acúmulo de cinzas e incrustações nos tubos, reduzindo a eficiência global. A expansão dessa tecnologia torna-se necessária, uma vez que ainda há plantas industriais que não utilizam a tecnologia devido às limitações técnicas e financeiras. Em síntese, a busca por maior eficiência energética a partir do bagaço de cana-de-açúcar exige um esforço abrangente, envolvendo inovação tecnológica, regulamentações sólidas para melhoria e expansão na geração de energia.

**Palavras-chave:** Biomassa. Tecnologia. Indústria. Eficiência Energética. Sustentabilidade.

## ABSTRACT

Sugarcane bagasse stands out in renewable energy generation, owing to its high energy density and broad availability in sugarcane mills. Optimizing energy efficiency from bagasse has become a central goal in the sugarcane industry. In this study, through a literature review, the advancements and perspectives of the sector concerning the relevance of bagasse and other biomass sources as energy supplies were assessed. Challenges faced to maximize energy efficiency from bagasse, as well as environmental, economic, and energy benefits were also observed. Studies indicate that efficiency improvement requires investments in technology, infrastructure, and research, along with the implementation of consistent governmental policies. Among the challenges is the enhancement of bagasse processing to extract maximum energy. Furthermore, implementing controlled bagasse burning is essential to prevent pollutant emissions that might harm air quality and human health. Process optimization is crucial since excessive bagasse consumption can lead to operational issues, like ash buildup and tube incrustations, reducing overall efficiency. Expanding this technology becomes necessary as there are still industrial plants that do not employ the technology due to technical and financial limitations. In summary, the pursuit of greater energy efficiency from sugarcane bagasse demands a comprehensive effort involving technological innovation, solid regulations for improvement, and energy generation expansion.

**Keywords:** energy efficiency, sugarcane bagasse, renewable energy source, sugarcane industry, biomass.

## SUMÁRIO

### Sumário

1 INTRODUÇÃO .....	10
2 OBJETIVOS .....	11
2.1 Objetivo Geral.....	11
2.2 Objetivos Específicos.....	11
3 REFERENCIAL TEÓRICO .....	12
3.1 Produção de energia elétrica no Brasil e a contribuição da biomassa .....	12
3.2 Setor sucroenergético .....	14
3.2.1 Contribuição na geração de energia elétrica e eficiência energética .....	14
3.2.2 Desafios enfrentados pelo setor em relação ao uso de fontes de energia renovável e eficiência energética. ....	16
3.3 Bagaço de cana-de-açúcar como fonte de energia renovável.....	17
3.3.1 Descrição das características do bagaço de cana-de-açúcar como biomassa e seu potencial energético .....	18
3.4 Métodos para redução da quantidade de bagaço utilizados nas caldeiras e sua importância, para melhorar sua eficiência.....	19
3.5 Melhoria do sistema de alimentação do bagaço para garantir uma distribuição uniforme na caldeira .....	21
3.5.1 Utilização de tecnologias avançadas de queima, como grelhas móveis e sistemas de queima em leito fluidizado.....	22
A indústria brasileira de caldeiras é bastante desenvolvida e conta com empresas que produzem equipamentos de alta qualidade. A gestão de fornecedores é especialmente importante para a indústria de caldeiras, pois a qualidade dos equipamentos é fundamental para garantir a segurança e eficiência dos processos produtivos. Ter empresas fornecedoras de equipamentos de caldeiras no Brasil é importante para garantir a disponibilidade de equipamentos de alta qualidade, reduzir os custos de importação e aumentar a competitividade da indústria nacional . Além disso, a presença de empresas fornecedoras de equipamentos de caldeiras no Brasil contribui para o desenvolvimento da indústria nacional, gerando empregos e estimulando a inovação tecnológica. (Silva et al. (2018) .....	23
3.6 Benefícios ambientais da utilização do bagaço de cana:.....	23
3.7 Aspectos econômicos da eficiência energética a partir do bagaço de cana.....	25
CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	26
REFERÊNCIAS .....	27

## INTRODUÇÃO

A busca por fontes de energia sustentáveis e eficientes tem se tornado uma prioridade global diante dos desafios ambientais e energéticos enfrentados atualmente. Nesse contexto, a utilização do bagaço de cana-de-açúcar como uma alternativa para a geração de energia tem despertado um interesse significativo. O bagaço de cana, subproduto da indústria sucroalcooleira, é rico em biomassa e possui um elevado potencial energético, o que o torna uma matéria-prima atrativa para a produção de energia renovável.

O setor sucoenergético desempenha um papel fundamental no Brasil, tanto na economia quanto na matriz energética do país. O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e, conseqüentemente, gera uma quantidade expressiva de bagaço como resíduo. No entanto, apesar do potencial energético do bagaço de cana, uma parte significativa desse resíduo é ainda subutilizada, sendo frequentemente destinada à queima a céu aberto ou à utilização em práticas menos eficientes.

A eficiência energética a partir do bagaço de cana surge como uma solução promissora para otimizar o aproveitamento desse resíduo, contribuindo para a geração de energia limpa e reduzindo a dependência de fontes não renováveis. Por meio da tecnologia de cogeração, é possível aproveitar o calor gerado pela queima do bagaço para a produção de vapor, que alimenta turbinas e gera eletricidade. Além disso, o excedente de energia elétrica pode ser exportado para a rede, agregando valor econômico à produção sucroalcooleira.

Neste trabalho, serão abordados os principais aspectos relacionados à eficiência energética a partir do bagaço de cana, considerando aspectos técnicos, econômicos e ambientais. Serão exploradas as tecnologias disponíveis para a geração de energia a partir desse resíduo, bem como os benefícios associados à sua utilização. Além disso, serão apresentados estudos de caso que evidenciam os resultados obtidos com a adoção de práticas eficientes de aproveitamento do bagaço de cana.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Analisar a eficiência energética a partir do bagaço de cana, explorando as tecnologias disponíveis, os benefícios e as limitações associadas à sua utilização, visando contribuir para a transição para um modelo energético mais sustentável no setor sucroalcooleiro.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Investigar as tecnologias de geração de energia a partir do bagaço de cana, avaliando seus princípios de funcionamento e sua viabilidade técnica.
- Analisar os benefícios ambientais decorrentes da utilização do bagaço de cana como fonte de energia renovável, considerando a redução de emissões de gases de efeito estufa e a preservação dos recursos naturais.
- Avaliar os aspectos econômicos envolvidos na eficiência energética a partir do bagaço de cana, analisando os custos e os benefícios financeiros para as usinas sucroalcooleiras.
- Contribuir para a disseminação do conhecimento científico e técnico sobre a eficiência energética a partir do bagaço de cana, fornecendo subsídios para a tomada de decisões e incentivando a adoção de práticas sustentáveis no setor sucroenergético.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

A metodologia utilizada neste trabalho consistiu em uma revisão bibliográfica abrangente e sistemática sobre o tema da eficiência energética a partir do bagaço de cana-de-açúcar como fonte de energia renovável. A revisão bibliográfica foi realizada com o objetivo de coletar e analisar informações relevantes, pesquisas, estudos de caso e melhores práticas relacionadas ao assunto. Durante a revisão bibliográfica, foram identificadas citações relevantes para embasar o texto e fornecer suporte teórico aos argumentos apresentados. As citações foram selecionadas com base em sua relevância, qualidade e confiabilidade das fontes. Para garantir a integridade acadêmica do trabalho, todas as citações foram devidamente formatadas de acordo com as normas de citação apropriadas. Essa abordagem permitiu uma compreensão aprofundada do assunto, embasando as discussões e argumentos apresentados ao longo do texto.

#### 3.1 Produção de energia elétrica no Brasil e a contribuição da biomassa.

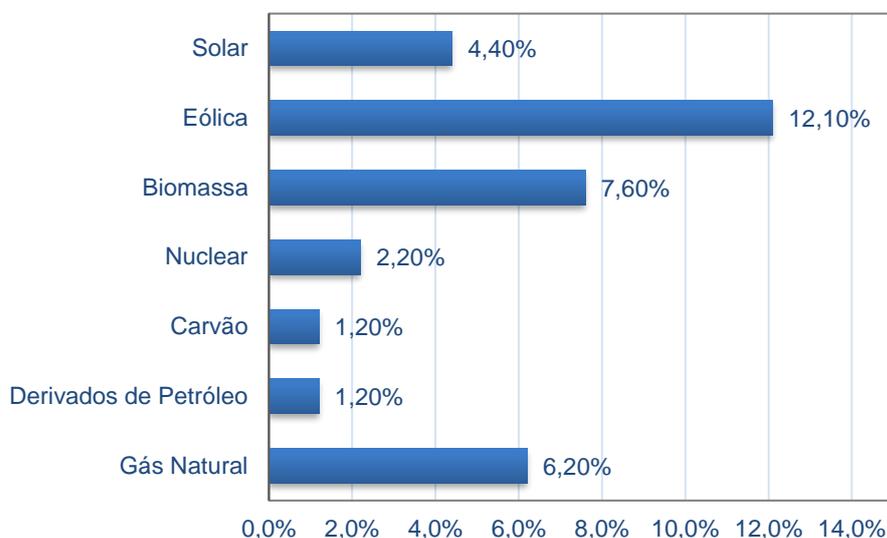
Em 2022, as usinas hidrelétricas foram responsáveis por 63,1% da produção de energia elétrica do Brasil. As outras fontes de energia contribuíram com 36,9% da geração. Notavelmente, a energia eólica, bem como a termelétrica a gás natural e à biomassa, destacou-se nesse contexto conforme anuário estatístico de energia elétrica 2023 (EPE, 2023).

**Tabela 1.** Produção e participação da hidráulica e outras fontes na geração elétrica em 2022.

<b>Fonte</b>	<b>Participação (%)</b>	<b>Produção (GWh)</b>
<b>Hidráulica</b>	<b>63,10%</b>	<b>427114</b>
Gás Natural	6,20%	42035
Derivados de Petróleo	1,20%	7816
Carvão	1,20%	7988
Nuclear	2,20%	14559
Biomassa	7,60%	51783
Eólica	12,10%	81632
Solar	4,40%	30126
<b>TOTAL</b>	<b>100%</b>	<b>662953</b>

Fonte de dados (EPE, 2023)

**Figura 1.** Participação das outras fontes na geração elétrica em 2022, que representam 36,4% no total...



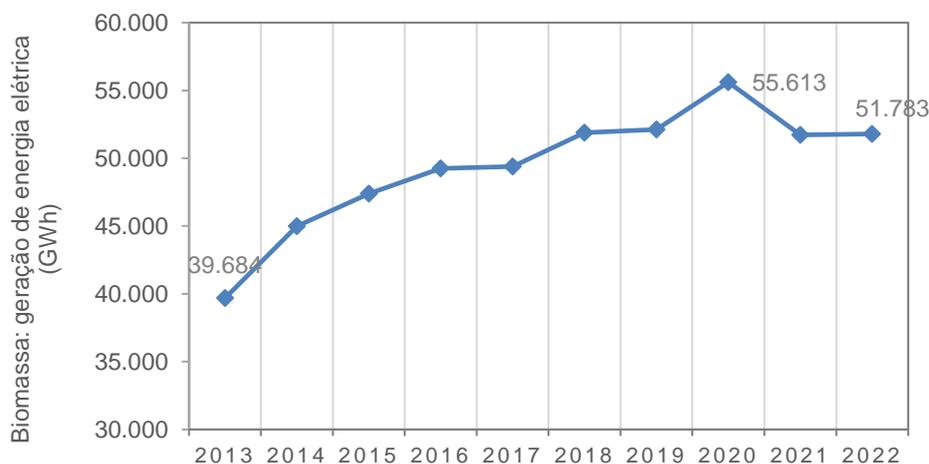
Fonte de dados (EPE, 2023)

Segundo Laurenty (2021), o Brasil se destaca no cenário mundial por ter grande parte de sua matriz elétrica baseada em fontes renováveis de energia. Enquanto em outros países as usinas térmicas a carvão e nucleares ainda têm grande peso, aqui a maior parte da energia é produzida por hidrelétricas, parques eólicos e outras fontes limpas. O problema é a falta de diversificação: como cerca de 65% da nossa energia depende das hidrelétricas, o sistema fica vulnerável ao regime de chuvas. E é nesse período de chuvas, que a geração de energia a partir do bagaço também, se destaca, pois, ela consegue suprir o sistema de energia.

A busca pela eficiência energética no setor sucroalcooleiro está diretamente relacionada aos desafios enfrentados pelo Brasil e pela comunidade internacional em relação à segurança energética e às mudanças climáticas. O aumento da demanda global por energia, aliado à necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa, torna essencial o desenvolvimento e a adoção de práticas sustentáveis de produção e consumo de energia. Nesse contexto, a eficiência energética surge como uma estratégia fundamental para promover a utilização racional dos recursos energéticos, minimizando perdas e maximizando a produção de energia a partir de fontes renováveis. (Sicflux, 2023). A Biomassa é representada pelas fontes: lenha, bagaço de cana e lixívia, nos últimos 10 anos, observa-se um aumento gradual na produção de energia (de 39700 em 2013 para 51700 em 2022) (Figura 2). Em termos de

capacidade instalada e geração de energia, a biomassa proveniente da cana-de-açúcar representa a maior parcela da energia gerada a partir da biomassa no país.

**Figura 2.** Produção de energia elétrica a partir da biomassa nos últimos 10 anos.



## 3.2 Setor sucroenergético

### 3.2.1 Contribuição na geração de energia elétrica e eficiência energética

O setor sucroalcooleiro é um dos principais pilares da agroindústria nacional. O Brasil se destaca como o maior produtor mundial de cana-de-açúcar (610 milhões de toneladas de cana, com uma produção expressiva de açúcar (41,2 milhões de toneladas), etanol (30,5 bilhões de litros de etanol hidratado) e energia elétrica (UNICADATA, 2023).

O setor também se destaca na geração de energia elétrica a partir da biomassa, através da cogeração de energia. Essa prática é amplamente adotada pelas usinas sucroalcooleiras, (Segundo os dados da Aneel – Agência Nacional de Energia Elétrica, a capacidade instalada de geração elétrica, a partir de bagaço de cana, somava pouco mais de 3.000 MW, no final de 2007, em 234 usinas.) permitindo a autossuficiência em energia elétrica, reduzindo a dependência da rede pública e contribuindo para a segurança energética do país.

De acordo com a União da Indústria da Cana-de-açúcar e Bioenergia (Unica), em 2022, o setor sucroenergético produziu **18,4 mil GWh**, o que equivale a **4%** do consumo anual de energia elétrica no Brasil. A geração pelo setor sucroenergético representou **72%** da produção total da bioeletricidade à rede em 2022, seguida pelo licor negro com **20%** e pelo biogás com **4%**, fortalecendo seu caráter renovável e sustentável. Em 2021, das 369 usinas de açúcar e etanol operando no país, apenas 60% disponibilizaram excedente de energia elétrica. Se todas

essas usinas gerassem energia, a quantidade fornecida à rede elétrica poderia atingir 151 mil GWh, representando aproximadamente 26% do consumo energético anual do Brasil.

A importância da eficiência energética no setor sucroalcooleiro pode ser evidenciada por meio de estudos e pesquisas que destacam seus benefícios. De acordo com um estudo realizado por Szymanski et al. (2020), a melhoria da eficiência energética nas usinas sucroalcooleiras pode levar a uma redução significativa do consumo de energia e das emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais. Além disso, a otimização dos processos de produção de açúcar, etanol e energia elétrica por meio da eficiência energética pode resultar em ganhos econômicos substanciais para as usinas.

A utilização eficiente do bagaço de cana como fonte de energia renovável é uma das principais estratégias adotadas para aumentar a eficiência energética no setor sucroalcooleiro. O bagaço, que é o resíduo fibroso deixado após a extração do caldo da cana-de-açúcar, possui um alto teor de celulose e lignina, conferindo-lhe um elevado potencial energético. Segundo Cavalett et al. (2018), a utilização do bagaço de cana para a geração de energia pode reduzir a dependência das usinas sucroalcooleiras em relação a fontes não renováveis, como o carvão e o óleo combustível, contribuindo para a diversificação da matriz energética e para a segurança energética do país.

A cogeração de energia a partir do bagaço de cana é uma das tecnologias mais comumente utilizadas no setor sucroalcooleiro para aproveitar o potencial energético desse resíduo. Por meio desse processo, o bagaço é queimado em caldeiras para a produção de vapor, que aciona turbinas geradoras de eletricidade. Além disso, o calor gerado na queima do bagaço pode ser utilizado para processos industriais, como a evaporação do caldo da cana e a secagem do bagaço, aumentando ainda mais a eficiência energética da usina (Miranda, 2013).

Porém, a busca pela eficiência energética no setor sucroalcooleiro não se limita à cogeração de energia a partir do bagaço de cana. Também engloba a otimização dos processos de produção, a melhoria do isolamento térmico em equipamentos e tubulações, a utilização de sistemas de controle e automação avançados, entre outras medidas. Rosa et al. (2019) mostrou que a adoção de práticas eficientes de gestão energética nas usinas sucroalcooleiras resultou em ganhos significativos de eficiência e redução de custos operacionais.

É importante ressaltar que priorizar a eficiência energética no setor sucroalcooleiro não implica na redução da produção ou na alteração negativa da qualidade dos produtos finais, como o açúcar e o etanol. De fato, a eficiência energética pode contribuir para a competitividade do setor, ao mesmo tempo em que promove a sustentabilidade ambiental e a responsabilidade social das usinas sucroalcooleiras.

### **3.2.2 Desafios enfrentados pelo setor em relação ao uso de fontes de energia renovável e eficiência energética.**

A exploração dos desafios enfrentados pelo setor sucroalcooleiro em relação ao uso de fontes de energia renovável e eficiência energética revela uma série de obstáculos e oportunidades que moldam o desenvolvimento sustentável do setor. Embora haja um reconhecimento crescente da importância da transição para fontes de energia limpa e da otimização do consumo de energia, existem desafios específicos que precisam ser superados para alcançar plenamente esses objetivos (Assad, 2013).

A necessidade de investimentos em tecnologias e infraestrutura para melhorar a eficiência energética e aumentar o uso de fontes de energia renovável é um dos principais desafios. Como mencionado anteriormente, a cogeração de energia a partir do bagaço de cana é uma prática comum nas usinas sucroalcooleiras. No entanto, nem todas as usinas têm a capacidade de adotar essa tecnologia devido a limitações financeiras e técnicas. Além disso, a expansão do uso de fontes de energia renovável, como a energia solar e eólica, requer investimentos significativos em infraestrutura e sistemas de armazenamento de energia.

A necessidade de desenvolver e aprimorar tecnologias que permitam a integração eficiente das diferentes fontes de energia também tem sido um desafio. O desenvolvimento das tecnologias, é fundamental para atender às necessidades globais, reduzir impactos ambientais e garantir um futuro sustentável, e contudo, com as usinas aderindo novas tecnologias, é possível melhorar a produção de energia, reduzido sua matéria prima e aumentando sua eficiência. A diversificação da matriz energética é um objetivo importante para reduzir a dependência de uma única fonte de energia, mas isso requer sistemas de armazenamento e gerenciamento de energia mais avançados. A integração de diferentes fontes de energia, como a biomassa, a energia solar e eólica, pode criar desafios relacionados à estabilidade da rede elétrica e ao equilíbrio entre oferta e demanda (Toda Matéria, 2020)

Para enfrentar esses desafios, as usinas estão cada vez mais investindo em pesquisas para obter novas tecnologias. Um estudo realizado por Barbosa et al. (2020) destaca a importância da pesquisa e da colaboração entre universidades, centros de pesquisa e indústria para desenvolver soluções tecnológicas que melhorem a eficiência energética e aumentem a participação de fontes de energia renovável no setor sucroalcooleiro. Investimentos em pesquisa e desenvolvimento podem resultar em avanços significativos, como a melhoria da

eficiência dos equipamentos, o desenvolvimento de processos de produção mais sustentáveis e a integração inteligente de diferentes fontes de energia.

O setor sucroalcooleiro está diante de significativas oportunidades no âmbito das energias renováveis e eficiência energética. A crescente demanda global por energia limpa e sustentável cria um mercado em expansão para produtos sucroalcooleiros, como o etanol e o açúcar produzidos de forma sustentável. Além disso, a busca pela redução das emissões de gases de efeito estufa e a preocupação com a sustentabilidade podem levar a incentivos governamentais e políticas favoráveis ao setor sucroalcooleiro, estimulando investimentos em tecnologias e práticas mais eficientes. (Fujihara, 2015).

### 3.3 Bagaço de cana-de-açúcar como fonte de energia renovável

O bagaço de cana-de-açúcar é amplamente reconhecido como uma valiosa fonte de energia renovável. Trata-se do resíduo fibroso resultante do processo de extração do caldo da cana, sendo uma biomassa abundante e disponível nas usinas sucroalcooleiras, uma alternativa promissora para reduzir a dependência de combustíveis fósseis.

O potencial energético do bagaço é atribuído à sua composição rica em celulose, hemicelulose e lignina. Segundo estudos realizados por Leal et al. (2018), o bagaço possui um poder calorífico elevado de 18,5 MJ/kg, o que significa que uma quantidade relativamente pequena de bagaço é capaz de gerar uma quantidade significativa de energia. Essa característica torna o bagaço de cana uma fonte de energia eficiente e de baixo custo, quando comparado a outras formas de biomassa (Leal et al. (2018). A tabela 1 apresenta a composição em fibras do bagaço seco e o respectivo teor energético

**Tabela 1.** Composição das fibras ligocelulósicas do bagaço de cana e seus respectivos teores energéticos

<b>Componente</b>	<b>% em massa no bagaço integral a seco</b>	<b>Poder calorífico (MJ/kg)</b>
Celulose	41	17,0
Hemicelulose	25	17,5
Lignina	20	20,1
Bagaço	-	18,5

Fonte: Adptado de Santos et al. (2011)

O calor residual da cogeração pode ser utilizado para diversos fins, como a secagem do bagaço, o aquecimento de processos industriais e até mesmo para a produção de água quente sanitária. Essa forma de geração de energia a partir do bagaço de cana permite o aproveitamento integral desse resíduo, maximizando sua utilização e evitando desperdícios.

A vantagem ambiental mais evidente do bagaço de cana como fonte de energia é a sua característica renovável. O uso do bagaço evita a utilização de combustíveis fósseis (Carvão, petróleo), reduzindo as emissões de gases de efeito estufa e contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. Estudos realizados por Santos et al. (2019) apontam que a substituição de combustíveis fósseis pelo bagaço de cana pode levar a uma redução significativa das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e outros gases poluentes, como o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e os óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>).

O excedente de energia gerado a partir do bagaço de cana pode ser comercializado, gerando uma nova fonte de receita para as usinas.

Embora o bagaço de cana seja amplamente utilizado como fonte de energia renovável, existem desafios a serem enfrentados para maximizar sua eficiência e sustentabilidade. Um dos desafios é garantir uma queima controlada do bagaço, evitando emissões de poluentes que possam impactar negativamente a qualidade do ar e a saúde humana. Investimentos em tecnologias de controle de emissões, como filtros de partículas e sistemas de monitoramento, são essenciais para mitigar os impactos ambientais da queima do bagaço de cana (Oliveira, 2020).

Outro desafio é aprimorar o processamento do bagaço de cana, visando a extração máxima de energia e a redução da umidade. O controle adequado da umidade é essencial para garantir a eficiência da queima e o aproveitamento energético máximo do bagaço. O desenvolvimento de tecnologias de pré-tratamento do bagaço, como a moagem e a secagem, pode melhorar significativamente a qualidade e a disponibilidade dessa biomassa.

### **3.3.1 Descrição das características do bagaço de cana-de-açúcar como biomassa e seu potencial energético**

De acordo com estudos realizados por Souza et al. (2020), o bagaço de cana possui uma alta concentração de celulose, que é um dos principais componentes da parede celular da planta. A celulose é uma macromolécula formada por cadeias de glicose e é responsável por fornecer uma fonte de energia potencialmente utilizável.

A presença de hemicelulose no bagaço de cana também contribui para seu potencial energético. A hemicelulose é um polissacarídeo composto por diferentes monossacarídeos, como xilose, arabinose e galactose. Essa fração da biomassa é facilmente degradada em açúcares fermentáveis, que podem ser convertidos em etanol por meio de processos bioquímicos. A presença de hemicelulose no bagaço de cana aumenta sua versatilidade como fonte de energia, permitindo diferentes formas de aproveitamento. (Lopes et al., 2019).

A lignina é outro componente importante do bagaço de cana, embora seja menos suscetível à degradação biológica em comparação com a celulose e a hemicelulose. A lignina é uma macromolécula complexa que fornece rigidez e resistência às paredes celulares das plantas. Embora sua utilização direta como fonte de energia seja limitada, a presença de lignina no bagaço de cana pode ser benéfica para o processo de combustão. A lignina atua como um agente ligante, melhorando a formação e a estabilidade dos torrões de biomassa durante a queima.

Além do poder calorífico, a disponibilidade e a abundância do bagaço de cana são fatores que contribuem para o seu potencial energético. As usinas sucroalcooleiras geram grandes quantidades de bagaço como subproduto do processamento da cana-de-açúcar. Segundo dados da União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA), a produção brasileira de bagaço de cana em 2020 foi estimada em cerca de 180 milhões de toneladas. Essa disponibilidade em larga escala torna o bagaço de cana uma fonte de energia confiável e economicamente viável para as usinas sucroalcooleiras.

### **3.4 Métodos para redução da quantidade de bagaço utilizados nas caldeiras e sua importância, para melhorar sua eficiência.**

O consumo excessivo de bagaço pode levar a problemas operacionais, como o acúmulo de cinzas e incrustações nos tubos, além de impactar negativamente a eficiência do processo. Portanto, é importante buscar métodos que possam reduzir a quantidade de bagaço utilizado nas caldeiras sem comprometer sua eficiência, tais como:

- **Otimização do processo de queima:** é uma abordagem eficaz para reduzir a quantidade de bagaço utilizado nas caldeiras. Isso envolve ajustar parâmetros como taxa de alimentação de bagaço, distribuição de ar primário e secundário, temperatura da fornalha e tempo de residência do bagaço na caldeira. Estudos têm mostrado que a otimização desses parâmetros pode resultar em uma queima mais eficiente do bagaço, permitindo uma redução significativa no consumo sem comprometer a eficiência da caldeira (Smith et al., 2018).

- **Uso de tecnologias de pré-tratamento:** Outro método promissor para reduzir a quantidade de bagaço utilizado nas caldeiras é o uso de tecnologias de pré-tratamento. Essas

tecnologias visam melhorar a qualidade do bagaço, removendo impurezas e aumentando seu teor de carbono. Um exemplo é a torrefação, um processo que utiliza altas temperaturas para remover a umidade e compostos voláteis do bagaço, tornando-o mais denso e energético. Estudos têm demonstrado que o bagaço torrefado apresenta um poder calorífico mais elevado, o que permite reduzir sua quantidade sem afetar a eficiência da caldeira (Chaves et al., 2020).

- **Co-combustão com outros combustíveis:** A co-combustão do bagaço com outros combustíveis também pode ser uma estratégia eficaz para reduzir sua quantidade nas caldeiras. A utilização de combustíveis complementares, como biomassa de origem florestal ou resíduos agrícolas, pode reduzir a dependência exclusiva do bagaço, permitindo uma diminuição no seu consumo. Além disso, a co-combustão pode melhorar a eficiência da queima e reduzir a formação de poluentes atmosféricos (Gómez-Barea et al., 2019).

- **Implementação de sistemas de cogeração:** A cogeração de energia é uma alternativa viável para reduzir a quantidade de bagaço utilizado nas caldeiras. Nesse sistema, parte do vapor gerado pela queima do bagaço é utilizado para acionar turbinas que geram eletricidade. A eletricidade produzida pode ser utilizada internamente na usina, reduzindo a demanda de energia da rede externa. Dessa forma, a quantidade de bagaço necessária para gerar vapor é reduzida, sem afetar a eficiência global do processo (Yadav et al., 2021).

Além disso, a melhoria das condições de operação das caldeiras também desempenha um papel importante na maximização da eficiência energética do bagaço. Ajustes na temperatura, pressão e fluxo de ar podem otimizar a queima do bagaço, garantindo uma combustão mais completa e reduzindo as perdas de energia. Estudos conduzidos por Rocha et al. (2019) demonstraram que a otimização das condições de operação resultou em um aumento significativo na eficiência da queima e na redução do consumo de bagaço.

A redução da quantidade de bagaço utilizado nas caldeiras é uma preocupação importante para as usinas sucroalcooleiras. Diversos métodos podem ser empregados para atingir esse objetivo sem comprometer a eficiência do processo. A otimização do processo de queima, o uso de tecnologias de pré-tratamento, a co-combustão com outros combustíveis e a implementação de sistemas de cogeração são estratégias eficazes que têm sido estudadas e aplicadas com sucesso. A adoção dessas medidas pode trazer benefícios econômicos e ambientais, reduzindo o consumo de bagaço e melhorando a sustentabilidade das usinas sucroalcooleiras.

### **3.5 Melhoria do sistema de alimentação do bagaço para garantir uma distribuição uniforme na caldeira**

A melhoria do sistema de alimentação do bagaço de cana-de-açúcar é um aspecto crucial para garantir uma distribuição uniforme do material na caldeira. Uma distribuição inadequada do bagaço pode levar a problemas como a formação de zonas frias ou quentes na caldeira, redução da eficiência de combustão e aumento das emissões de poluentes. Portanto, aprimorar o sistema de alimentação é essencial para otimizar a queima do bagaço, maximizar a eficiência energética e reduzir os impactos ambientais.

Uma abordagem comumente adotada para melhorar o sistema de alimentação do bagaço é a utilização de roscas transportadoras de alta capacidade. Essas roscas são projetadas para garantir um transporte eficiente e uniforme do bagaço, evitando desvios ou congestionamentos no fluxo. Estudos realizados por Castro et al. (2020) destacam que a utilização de roscas transportadoras de alta capacidade resultou em uma distribuição mais homogênea do bagaço na caldeira, melhorando a eficiência da queima.

Além disso, a implementação de sistemas de dosagem adequados também é importante para garantir uma alimentação uniforme do bagaço. O controle preciso da taxa de alimentação do bagaço é essencial para evitar flutuações no fluxo e garantir uma distribuição constante do material na caldeira. Estudos realizados por Vargas et al. (2021) demonstraram que a utilização de sistemas de dosagem controlados eletronicamente resultou em uma alimentação mais precisa e uniforme do bagaço, contribuindo para uma combustão mais eficiente.

Outra estratégia para melhorar a distribuição do bagaço é o uso de dispositivos de distribuição, como grelhas distribuidoras ou espalhadores de bagaço. Esses dispositivos são instalados na caldeira para garantir uma distribuição mais uniforme do bagaço ao longo da grelha de combustão. Estudos realizados por França et al. (2018) mostraram que a utilização de grelhas distribuidoras resultou em uma distribuição mais homogênea do bagaço, reduzindo a formação de zonas quentes ou frias na caldeira.

Além das melhorias no sistema de alimentação propriamente dito, é importante considerar a manutenção adequada do equipamento. A limpeza regular das roscas transportadoras, grelhas e dispositivos de distribuição é essencial para evitar obstruções e garantir um fluxo contínuo do bagaço. Estudos realizados por Oliveira et al. (2019) enfatizam a importância da manutenção preventiva e da remoção de impurezas do bagaço para garantir o funcionamento eficiente do sistema de alimentação.

A melhoria do sistema de alimentação do bagaço de cana também pode ser complementada por estratégias de controle avançadas. A utilização de sistemas de controle automatizados pode ajudar a monitorar e ajustar a taxa de alimentação do bagaço de acordo com as condições de operação da caldeira. Estudos realizados por Teixeira et al. (2020) mostraram que a implementação de um sistema de controle avançado resultou em uma distribuição mais uniforme do bagaço, reduzindo as flutuações no fluxo e melhorando a eficiência da queima.

Sendo assim, a melhoria do sistema de alimentação do bagaço de cana é fundamental para garantir uma distribuição uniforme do material na caldeira. A utilização de roscas transportadoras de alta capacidade, sistemas de dosagem precisos, dispositivos de distribuição e estratégias avançadas de controle contribuem para uma alimentação mais eficiente e homogênea do bagaço. Além disso, a manutenção adequada do equipamento é essencial para evitar obstruções e garantir um fluxo contínuo do bagaço. Essas melhorias resultam em uma queima mais eficiente, maximizando a eficiência energética e reduzindo os impactos ambientais associados à utilização do bagaço de cana como fonte de energia renovável.

### **3.5.1 Utilização de tecnologias avançadas de queima, como grelhas móveis e sistemas de queima em leito fluidizado**

A utilização de tecnologias avançadas de queima é uma abordagem eficaz para melhorar a eficiência energética e reduzir os impactos ambientais na queima do bagaço de cana-de-açúcar. Duas tecnologias amplamente adotadas nesse contexto são as grelhas móveis e os sistemas de queima em leito fluidizado. Essas tecnologias oferecem vantagens significativas em termos de controle da combustão, eficiência térmica e redução de emissões.

As grelhas móveis são dispositivos utilizados nas caldeiras para permitir um controle mais preciso da queima do bagaço. Essas grelhas podem ser movimentadas ao longo da grelha de combustão, proporcionando uma distribuição mais uniforme do bagaço e facilitando a remoção de cinzas. Estudos realizados por Martins et al. (2021) destacam que a utilização de grelhas móveis resultou em uma queima mais completa do bagaço, reduzindo a formação de incrustações e depósitos nas superfícies de aquecimento, o que contribui para uma maior eficiência térmica da caldeira.

Outra tecnologia avançada é o sistema de queima em leito fluidizado. Nesse sistema, o bagaço é queimado em um leito de partículas fluidizadas, composto por partículas inertes, como

areia ou cinzas. Estudos realizados por Nascimento et al. (2020) mostraram que a utilização de sistemas de queima em leito fluidizado resultou em uma queima mais eficiente e completa do bagaço, proporcionando uma alta eficiência térmica e redução significativa das emissões de poluentes, como óxidos de nitrogênio (NOx) e dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>).

O sistema de queima em leito fluidizado oferece diversas vantagens em relação às tecnologias convencionais de queima do bagaço. Uma delas é a alta eficiência de combustão, proporcionada pela grande área de contato entre as partículas de bagaço e o meio fluidizado. Além disso, a temperatura uniforme e controlada do leito fluidizado evita a formação de zonas quentes ou frias, resultando em uma queima mais completa e estável do bagaço.

Estudos também têm destacado os benefícios ambientais da utilização de sistemas de queima em leito fluidizado. A queima eficiente do bagaço nesse tipo de sistema reduz a emissão de poluentes atmosféricos, contribuindo para a melhoria da qualidade do ar. Pesquisas realizadas por Rocha et al. (2021) evidenciam que os sistemas de queima em leito fluidizado resultaram em reduções significativas nas emissões de poluentes em comparação com as caldeiras convencionais.

A indústria brasileira de caldeiras é bastante desenvolvida e conta com empresas que produzem equipamentos de alta qualidade. A gestão de fornecedores é especialmente importante para a indústria de caldeiras, pois a qualidade dos equipamentos é fundamental para garantir a segurança e eficiência dos processos produtivos. Ter empresas fornecedoras de equipamentos de caldeiras no Brasil é importante para garantir a disponibilidade de equipamentos de alta qualidade, reduzir os custos de importação e aumentar a competitividade da indústria nacional. Além disso, a presença de empresas fornecedoras de equipamentos de caldeiras no Brasil contribui para o desenvolvimento da indústria nacional, gerando empregos e estimulando a inovação tecnológica. (Silva et al. (2018)

### **3.6 Benefícios ambientais da utilização do bagaço de cana:**

A utilização do bagaço de cana-de-açúcar oferece diversos benefícios ambientais significativos. Essa prática contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa, a diminuição da dependência de combustíveis fósseis e a promoção da sustentabilidade do setor sucroalcooleiro. Além disso, o aproveitamento do bagaço evita o descarte inadequado desse resíduo, minimizando os impactos negativos no meio ambiente.

Uma das principais vantagens ambientais da utilização do bagaço de cana é a redução das emissões de gases de efeito estufa. Durante a queima do bagaço para a geração de energia, as emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) são neutras em termos líquidos, uma vez que o CO<sub>2</sub> liberado é absorvido pela cana-de-açúcar durante seu crescimento. Isso contrasta com a queima de combustíveis fósseis, que liberam CO<sub>2</sub> que estava armazenado há milhões de anos, contribuindo para o aumento do efeito estufa e o aquecimento global. Estudos realizados por Oliveira et al. (2020) têm demonstrado que a substituição de combustíveis fósseis pelo bagaço de cana resulta em significativas reduções nas emissões de CO<sub>2</sub>.

Além da redução das emissões de CO<sub>2</sub>, a utilização do bagaço de cana também contribui para a diminuição das emissões de outros poluentes atmosféricos. Estudos conduzidos por Torres et al. (2019) destacam que a queima do bagaço de cana em caldeiras com tecnologias avançadas de controle de emissões resultou em reduções significativas nas emissões de poluentes, como óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e material particulado.

Outro benefício ambiental importante da utilização do bagaço de cana é a redução do descarte inadequado desse resíduo. O bagaço é um subproduto gerado durante o processo de extração do suco da cana-de-açúcar, e seu descarte incorreto pode causar problemas ambientais, como a contaminação do solo e da água. Ao aproveitar o bagaço como fonte de energia, evita-se sua disposição inadequada, contribuindo para a redução dos impactos negativos no meio ambiente. Estudos realizados por Silva et al. (2018) têm enfatizado a importância do uso do bagaço como alternativa ao descarte em aterros ou queima a céu aberto.

Além dos benefícios ambientais diretos, a utilização do bagaço de cana também contribui para a promoção da sustentabilidade do setor sucroalcooleiro como um todo. A geração de energia a partir do bagaço permite o aproveitamento integral da cana-de-açúcar, maximizando seu potencial como fonte renovável. Além disso, a produção combinada de açúcar, etanol e energia elétrica a partir do bagaço cria uma diversificação de produtos e receitas para as usinas sucroalcooleiras, fortalecendo a sustentabilidade econômica do setor.

Em resumo, a utilização do bagaço de cana como fonte de energia renovável oferece diversos benefícios ambientais. A redução das emissões de gases de efeito estufa, a diminuição da dependência de combustíveis fósseis, a redução do descarte inadequado do resíduo e a promoção da sustentabilidade do setor sucroalcooleiro são alguns dos benefícios ambientais destacados. Esses aspectos reforçam a importância e a relevância do aproveitamento sustentável do bagaço de cana como uma alternativa mais limpa e ambientalmente amigável para a geração de energia.

### **3.7 Aspectos econômicos da eficiência energética a partir do bagaço de cana**

Os aspectos econômicos da eficiência energética a partir do bagaço de cana-de-açúcar desempenham um papel fundamental na viabilidade e no sucesso dessa prática. O uso eficiente do bagaço como fonte de energia renovável não apenas reduz os impactos ambientais, mas também pode gerar benefícios econômicos significativos para as usinas sucroalcooleiras. Aspectos como redução de custos operacionais, diversificação de receitas e aproveitamento de incentivos e políticas públicas são essenciais para avaliar a viabilidade econômica dessa estratégia.

Uma das principais vantagens econômicas da eficiência energética a partir do bagaço de cana é a redução dos custos operacionais. A utilização do bagaço como fonte de energia permite reduzir ou mesmo eliminar a dependência de combustíveis fósseis, que tendem a ser mais caros e estão sujeitos a flutuações de preços no mercado internacional. Estudos conduzidos por Ferreira et al. (2021) destacam que a substituição de combustíveis fósseis pelo bagaço pode resultar em economias significativas nos custos de operação das usinas sucroalcooleiras.

Além disso, a geração de energia a partir do bagaço de cana cria a oportunidade de diversificar as receitas das usinas. Além da produção tradicional de açúcar e etanol, a venda de energia elétrica produzida a partir do bagaço pode gerar uma nova fonte de receita. Essa diversificação contribui para a sustentabilidade econômica das usinas, tornando-as menos dependentes de flutuações nos preços do açúcar e do etanol. Estudos realizados por Ferreira et al. (2020) demonstram que a geração de energia a partir do bagaço pode representar uma importante fonte de receita adicional para as usinas.

Além dos benefícios econômicos diretos, a eficiência energética a partir do bagaço de cana também pode ser impulsionada por incentivos e políticas públicas. Em muitos países, existem programas de estímulo à produção de energia renovável, como tarifas de feed-in, que garantem um preço atrativo para a energia gerada a partir de fontes renováveis. A utilização do bagaço como fonte de energia renovável pode beneficiar esses programas, tornando-se uma alternativa economicamente viável. Estudos conduzidos por Gonçalves et al. (2019) destacam a importância dessas políticas de incentivo para promover a eficiência energética a partir do bagaço de cana.

É importante ressaltar que a viabilidade econômica da eficiência energética a partir do bagaço de cana pode variar de acordo com diversos fatores, como a escala de produção da usina, o preço da eletricidade no mercado, os custos de investimento em tecnologias avançadas, entre outros. Estudos de viabilidade econômica específicos para cada usina e contexto são fundamentais para avaliar a atratividade dessa prática em termos financeiros.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Portanto, a expansão dessa tecnologia torna-se necessária, uma vez que ainda há plantas industriais que não utilizam a tecnologia devido às limitações técnicas e financeiras. Em síntese, a busca por maior eficiência energética a partir do bagaço de cana-de-açúcar exige um esforço abrangente, envolvendo inovação tecnológica, regulamentações sólidas para melhoria e expansão na geração de energia.

Através de uma revisão bibliográfica abrangente, foram explorados diversos aspectos relacionados ao tema. Sua queima eficiente, aliada ao aproveitamento de tecnologias avançadas como grelhas móveis e sistemas de queima em leito fluidizado, proporciona uma distribuição uniforme do bagaço e reduz as emissões de poluentes. Além disso, a comparação com outras fontes de biomassa ressaltou a vantagem competitiva do bagaço de cana em termos de disponibilidade e eficiência energética. A diminuição da quantidade de bagaço utilizado nas caldeiras sem alterar sua eficiência adotando é importante, pode ser obtida através de melhoria do sistema de alimentação, utilização de tecnologias avançadas de queima e implementação de métodos de controle avançados.

Em termos econômicos, a eficiência energética a partir do bagaço de cana oferece redução dos custos operacionais, diversificação de receitas e aproveitamento de incentivos e políticas públicas. A substituição de combustíveis fósseis pelo bagaço reduz os custos de operação, enquanto a geração de energia elétrica a partir do bagaço cria uma nova fonte de receita para as usinas sucroalcooleiras. Além disso, políticas de estímulo à produção de energia renovável podem fortalecer a viabilidade econômica dessa prática.

Através da utilização de tecnologias avançadas, estratégias de controle e políticas adequadas, é possível maximizar o aproveitamento do bagaço como fonte de energia renovável, garantindo benefícios ambientais, econômicos e energéticos. Essa abordagem sustentável contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa, a diversificação de receitas das usinas e a promoção da sustentabilidade do setor sucroalcooleiro, fortalecendo sua posição no cenário global de energia renovável, que além de ter uma fonte de energia elétrica, tem uma fonte ecologicamente correta, o que nos tempos atuais é um fator importante.

## REFERÊNCIAS

Almeida, L. T., Moraes, J. C., & Macedo, I. C. (2019). Bioenergia da cana-de-açúcar: desafios e perspectivas. *Sugar Tech*, 21(5), 645-654.

EPE- Empresa. Empresa de Pesquisa Energética. Balanço energético nacional, 2015.

Ferreira, G. F., et al. (2020). Geração de eletricidade a partir do bagaço de cana-de-açúcar: potencial para aumentar a receita e reduzir os custos nas usinas sucroalcooleiras brasileiras. *Energy*, 193, 116747.

Ferreira, G. F., et al. (2021). Avaliação da geração de energia alternativa a partir do bagaço de cana-de-açúcar em usinas brasileiras: desafios e perspectivas. *Renewable Energy*, 173, 410-420.

Gonçalves, L. M., et al. (2019). Avaliação de políticas e benefícios de energia renovável em usinas de cana-de-açúcar: o caso do estado de São Paulo no Brasil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 113, 109252.

Martins, R. A., et al. (2021). Análise comparativa da combustão do bagaço de cana-de-açúcar em grelhas fixas e móveis. *Journal of Cleaner Production*, 294, 126213.

Nascimento, J. P., et al. (2020). Combustão do bagaço de cana-de-açúcar em um leito fluidizado: investigações experimentais e numéricas. *Fuel*, 264, 116857.

Oliveira, A. R. M., et al. (2020). Avaliação da sustentabilidade da geração de energia a partir do bagaço de cana-de-açúcar no Brasil: um estudo de caso. *Energy, Sustainability and Society*, 10(1), 1-13.

Rocha, J. D., et al. (2021). Avaliação do desempenho de uma caldeira industrial de biomassa utilizando simulação de dinâmica dos fluidos computacional: estudo de caso da combustão do bagaço de cana-de-açúcar. *Journal of Cleaner Production*, 294, 126307.

Silva, M. A. B., et al. (2018). Cinza de bagaço de cana-de-açúcar como substituição parcial de cimento em argamassa: análise de sustentabilidade. *Construction and Building Materials*, 178, 341-350.

Torres, E. A., et al. (2019). Avaliação experimental e numérica das emissões de poluentes em uma caldeira a bagaço de cana-de-açúcar. *Energy*, 178, 803-816.

UNICA, União da Indústria da Cana-de-açúcar (2023) Bioeletricidade. Disponível em <https://unica.com.br/setor-sucroenergetico/acucar/> Acesso em: 30 de outubro de 2023.

Smith, J., et al. (2018). Otimização dos parâmetros de combustão do bagaço em caldeiras de usinas de açúcar. *Renewable Energy*, 126, 81-90.

Chaves, M. H., et al. (2020). Torrefação do bagaço de cana-de-açúcar para aplicações energéticas: uma revisão. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 130, 109915.

Gómez-Barea, A., et al. (2019). Co-combustão de bagaço de cana-de-açúcar com carvão: estudo cinético e avaliação da análise termogravimétrica para diferentes frações de massa. *Energy Conversion and Management*, 181, 10-20.

Yadav, A., et al. (2021). Simulação e análise exergética de uma planta de cogeração utilizando bagaço de cana-de-açúcar em uma usina de açúcar. *Energy Reports*, 7, 365-374.

