



Jessica Alves Pinheiro

Aspectos Evolutivos, Tecnológicos e Ambientais da Bioenergia do Bagaço da Cana-de-açúcar na Geração de Energia Elétrica no Brasil

Brasil

abril, 2024



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: JESSICA ALVES PINHEIRO

Matrícula: 20192010970042

Título do Trabalho: Aspectos Evolutivos, Tecnológicos e Ambientais da Bioenergia do Bagaço da Cana-de-açúcar na Geração de Energia Elétrica no Brasil

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia, 07/10/2024.

Local

Data

Jessica Alves Pinheiro

Aspectos Evolutivos, Tecnológicos e Ambientais da Bioenergia do Bagaço da Cana-de-açúcar na Geração de Energia Elétrica no Brasil

Defesa de Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Goiás - Campus Goiânia, como requisito parcial para obtenção do título de Graduado em Engenharia Mecânica.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – IFG

Graduação em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr.Jair Dinoah de Araújo Júnior

Brasil

abril, 2024

P654a Pinheiro, Jessica Alves.
Aspectos evolutivos, tecnológicos e ambientais da bioenergia do bagaço da cana-de-açúcar na geração de energia elétrica no Brasil / Jessica Alves Pinheiro. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia, 2024.
68 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Jair Dinoah de Araújo Júnior.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Bacharelado em Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.

1. Bioenergia. 2. Biomassa. 3. Cana-de açúcar. 4. Energia elétrica - Brasil. I. Araújo Junior, Jair Dinoah de (orientador). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia. III. Título.

CDD 333.79

Ficha catalográfica elaborada pelo Bibliotecário Alisson de Sousa Belthodo Santos CRB1/ 2.266
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA

ATA Nº 019/2024-1 – Disciplina TCC 2

SESSÃO PÚBLICA DE APRESENTAÇÃO E DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

No dia 10 de abril de 2024, às 14:00 horas, foi realizada a sessão pública de apresentação e DEFESA do Trabalho de Conclusão de Curso intitulado : “ASPECTOS EVOLUTIVOS, TECNOLÓGICOS E AMBIENTAIS DA BIOENERGIA DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR NA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE NO BRASIL” de autoria do acadêmico:

1. JESSICA ALVES PINHEIRO (MATRÍCULA: 20192010970042)

do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Mecânica, reconhecido pela Portaria/SRSES/MEC/Nº 309, de 28/04/2015, D.O.U. de 29/04/2015, Seção 1, p.33 como requisito para aprovação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2, sendo a banca composta pelos seguintes membros:

Professor(a) Dr(a). JAIR DINOAH DE ARAÚJO JUNIOR Orientador

Professor(a) Dr(a). PAULO HENRIQUE NEVES PIMENTA

Professor(a) Me(a). VINÍCIUS CARVALHAES

Após a apresentação, os autores foram arguidos pela banca examinadora, cujo parecer final foi:

Nota: (9,0)

(x) Aprovada em TCC2 () Reprovado em TCC 2

A presente ata foi lavrada após encerrar-se a sessão, sendo assinada pela banca examinadora.

COMENTÁRIOS DA BANCA:

Assinatura da Banca:

JAIR DINOAH DE ARAÚJO JUNIOR

PAULO HENRIQUE NEVES PIMENTA

VINÍCIUS CARVALHAES

Goiânia, 10 de abril de 2024.

COMENTÁRIOS DA COORDENAÇÃO:

Coordenação de Engenharia Mecânica

Documento assinado eletronicamente por:

- Thamise Sampaio Vasconcelos Vilela, COORDENADOR(A) DE CURSO - FUC1 - GYN-CCBEM, em 09/10/2024 19:50:48.
- Paulo Henrique Neves Pimenta, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO, em 09/10/2024 19:37:02.
- Vinicius Carvalhaes, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO, em 09/10/2024 18:29:09.
- Jair Dinoah de Araujo Junior, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO, em 09/10/2024 16:52:46.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 09/10/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 574298
Código de Autenticação: bf6484c864



Dedico este trabalho à minha família, cujo amor e apoio constante foram fundamentais em cada etapa deste percurso. A vocês, que sempre estiveram ao meu lado, agradeço por serem minha fonte de inspiração e força.

À pessoa que me apoiou em cada detalhe, meu amado, dedico este trabalho com todo o meu coração. Sua presença constante foi meu porto seguro durante todas as fases até a concretização deste. Agradeço por seu companheirismo e por partilhar comigo todas as alegrias e desafios desta caminhada.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder força, saúde e sabedoria para enfrentar os desafios ao longo deste trabalho.

Ao meu orientador (Dr. Jair Dinoah de Araujo Junior) pelos ensinamentos e dedicação até aqui. Pois, sua sabedoria e olhar crítico foram fundamentais para este desenvolvimento.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Campus Goiânia, em especial aos responsáveis pelo curso de Engenharia Mecânica, pelos recursos disponibilizados que contribuíram em toda a minha formação acadêmica.

Ao meu companheiro, pelo amor e por sempre acreditar em mim.

E a minha família, pela compreensão e apoio em todos os momentos.

"A natureza é o nosso lar original. A Engenharia é a nossa esperança de preservá-lo."

(Autor desconhecido)

Resumo

A bioenergia, derivada de fontes biológicas como biomassa e biocombustíveis, tem evoluído com avanços tecnológicos e mudanças nas políticas energéticas globais. O aumento na produção e consumo de biocombustíveis é impulsionado pela escassez de recursos naturais e pelas mudanças climáticas. Políticas de incentivo, como metas de mistura obrigatória, foram adotadas em muitos países para enfrentar esses desafios. A bioenergia desempenha um papel crucial na mitigação das mudanças climáticas. Este trabalho avalia sua evolução e propõe medidas para torná-la mais sustentável no Brasil. Foram priorizados estudos na região Centro-Sul do Brasil, a maior produtora de cana-de-açúcar, foi concluído que a produção de bioeletricidade a partir da cana-de-açúcar tem ganhado destaque e reconhecimento desde o seu surgimento. O aproveitamento eficiente da matéria-prima, o uso adequado e eficaz do bagaço e o consequente aumento do rendimento global da indústria são aspectos fundamentais nesse processo. Essa sinergia impulsiona não só a produção de energia limpa e renovável, mas também contribui para a sustentabilidade ambiental e econômica do setor sucroalcooleiro.

Palavras-chave: bioenergia, biomassa, gases de efeito estufa, cana-de-açúcar.

Abstract

Bioenergy, derived from biological sources such as biomass and biofuels, has evolved with technological advances and changes in global energy policies. The increase in biofuel production and consumption is driven by the scarcity of natural resources and climate change. Incentive policies, such as mandatory mixing targets, have been adopted in many countries to address these challenges. Bioenergy plays a crucial role in mitigating climate change. This work evaluates its evolution and proposes measures to make it more sustainable in Brazil. Studies were prioritized in the Center-South region of Brazil, the largest producer of sugar cane, and it was concluded that the production of bioelectricity from sugar cane has gained prominence and recognition since its emergence. The efficient use of raw materials, the adequate and effective use of bagasse and the consequent increase in the industry's overall yield are fundamental aspects in this process. This synergy not only boosts the production of clean and renewable energy, but also contributes to the environmental and economic sustainability of the sugar and alcohol sector.

Keywords: bioenergy, biomass, greenhouse gases, sugar cane.

Lista de ilustrações

1	Matriz elétrica do Brasil por combustível.	19
2	Fluxograma básico de uma usina sucroalcooleira.	22
3	Fluxos de carbono no sistema bioenergético.	24
4	Diagrama Esquemático dos processos de conversão energética da biomassa .	25
5	Estrutura da biomassa da cana-de-açúcar.	25
6	Geração de bioeletricidade a partir do bagaço da cana para a safra 2012/2013 até a safra 2021/2022.	28
7	Fases da metodologia ACV.	32
8	Impactos ambientais da produção de cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil.	34
9	Caldeira Flamotubular.	40
10	Caldeira Aquatubular.	41
11	Qualitativo da relação entre eficiência exergética do processo e os impactos ambientais associados.	48
12	Esquema do Ciclo Rankine	55
13	a) Desvios do Ciclo a vapor Real e Ideal de Rankine; b) O efeito das irrever- sibilidades na bomba e na turbina.	57
14	Efeito da queda na pressão do condensador.	57
15	Efeito do superaquecimento do vapor.	58
16	Efeito do aumento da pressão na caldeira.	58

Lista de tabelas

1	Composição média do bagaço da cana-de-açúcar.	27
2	Características do material lignocelulósico da cana-de-açúcar e Composição	35
3	Emissão de gases de efeito estufa (GEE) na agricultura e industrialização da cana-de-açúcar.	36
4	Permanência e concentração dos poluentes.	43
5	Porcentagem de carbono e emissões diretas.	44
6	Contribuição da agroindústria canavieira para a redução da taxa de CO_2 atmosférico.	44
7	Poder calorífico superior de alguns produtos.	51
8	PCI do bagaço com diferentes umidades e sacarose.	52
9	Composição química do bagaço de cana-de-açúcar	52
10	Consumo de energia fóssil, produção de energia renovável e balanço ener- gético do bioetanol.	53

Sumário

	Sumário	12
	1 INTRODUÇÃO	14
	2 OBJETIVOS	16
2.1	Objetivos Gerais	16
2.2	Objetivos Específicos	16
	3 METODOLOGIA	17
	4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
4.1	Bioenergia no Brasil, Uma Energia Verde	18
4.1.1	Cogeração de Energia no Brasil	20
4.1.2	Sistemas de Cogeração nas Sucroalcooleiras	22
4.1.3	Biomassa	23
4.1.4	Cana-de-açúcar	24
4.1.5	Biomassa do Bagaço da Cana-de-açúcar	27
4.2	Análise do Ciclo de Vida (ACV)	29
4.2.1	Análise do Ciclo de Vida como Ferramenta	30
4.2.2	Metodologia da ACV no Brasil	31
4.2.3	Software para ACV	32
4.2.4	ACV no Setor Sucroenergético	33
4.3	Geradores de Vapor na Indústria Sucroalcooleira	36
4.3.1	Caldeiras	38
4.3.2	Caldeiras a Biomassa	41
4.3.3	Emissões nas Caldeiras a Biomassa	43
4.3.4	Fundamentos da Termodinâmica	44
4.3.5	Primeira Lei da Termodinâmica	45
4.3.6	Segunda Lei da Termodinâmica	46
4.3.7	Exergia	47
4.3.8	Combustão	48
4.3.9	Estequiometria da Combustão	49
4.3.10	Bagaço da Cana-de-açúcar como Combustível	51
4.4	Turbinas a Vapor - Geradores de Eletricidade	53
4.4.1	Turbinas	54
4.4.2	Ciclo Rankine	55

4.4.3	Ciclo Rankine Real	56
4.4.4	O aumento da eficiência no ciclo Rankine	57
5	DISCUSSÃO	59
6	CONCLUSÃO	62
	REFERÊNCIAS	64

CAPÍTULO 1

Introdução

A ciência da energia é chamada de termodinâmica. Para Çengel e Boles (2013), esta é amplamente interpretada para incluir todos os aspectos da energia e suas transformações, entre elas a geração da energia elétrica, a refrigeração e as relações que existem entre as propriedades da matéria. Em conformidade a esta ciência, a Engenharia Mecânica interfere de modo significativo no que diz respeito à eficiência das máquinas térmicas, carregando assim a possibilidade de adequações eficientes a qualquer processo produtivo.

A geração de eletricidade no Brasil garante a dezenas de milhões de pessoas o benefício da energia elétrica, fator esse de suma importância ao desenvolvimento social. O vasto espaço territorial brasileiro, possibilita a diversidade da matriz energética do país. Nesse sentido, e em conformidade com a demanda ecológica mundial, o Brasil se destaca na produção de energia elétrica por meio da biomassa (renovável), sendo considerado o maior produtor da cana-de-açúcar do mundo. (SOUTO et al., 2018).

Através da evolução tecnológica os gastos energéticos aumentaram de modo descontrolado principalmente quando relacionados a energia elétrica. Sendo assim, a demanda pela produção cada vez maior e utilizando de variados recursos sendo eles limpos ou não, causam impactos negativos ao meio ambiente. Pensando em aumento da produção, a bioenergia é utilizada como uma maneira de reduzir os impactos ambientais causados pela produção de energia oriunda de combustíveis fósseis, como também, é a solução inteligente para os dejetos dos processos produtivos. Isso porque a bioenergia é obtida a partir de matéria orgânica, restos ou resíduos animais e vegetais, biomassa, e assim o impacto final na produção de Gases de Efeito Estufa (GEE) na produção de energia é bem menor. Neste processo energético podem ser utilizadas inúmeros tipos de biomassas, como a cana-de-açúcar, cavaco de eucalipto, casca de arroz, casca de coco entre outras (CORTEZ; LORA; GOMEZ, 2008).

A indústria sucroalcooleira responsável pela produção de açúcar, etanol entre outros derivados da cana-de-açúcar utiliza a biomassa produzida durante a moagem, o bagaço, como fonte de energia para a produção de vapor que alimenta robustas máquinas térmicas que garan-

tem a produção tanto de energia mecânica quanto de energia elétrica, onde todo um sistema é pensado para esse fim. Sendo este, o recurso biológico renovável mais abundante da Terra (SANTOS et al., 2012).

Décadas atrás, a lenha era o complemento do bagaço como fonte de energia primária para o processo de produção de açúcar-álcool, porém pela dificuldade de produção em determinadas regiões do país, aliada aos altos preços nasceu uma busca incessante por auto suficiência energética por parte das usinas. Métodos e melhorias no balanço energético foram desenvolvidos para que os sistemas, apenas com o bagaço da cana-de-açúcar, conseguissem operar. Assim, dentre outros aperfeiçoamentos, tornou-se necessário operar com maiores pressões de vapor nas caldeiras para se manter, dentro do princípio de cogeração, o equilíbrio entre as demandas (LEAL; MACEDO, 2004). Isso porque, era necessário garantir um equilíbrio entre as demandas de energia elétrica e energia térmica.

CAPÍTULO 2

Objetivos

2.1 Objetivos Gerais

O estudo irá analisar os aspectos evolutivos, tecnológicos e ambientais da produção de energia elétrica por meio do bagaço da cana-de-açúcar no Brasil.

2.2 Objetivos Específicos

- Contemplar uma visão histórica sobre a bioenergia no Brasil;
- Apresentar os fundamentos do ciclo de vida (ACV) da produção de bioenergia;
- Apresentar conceitos da termodinâmica, em especial ciclo de Rankine;
- Compreender a funcionalidade dos geradores de vapor nas indústrias sucroalcooleiras;
- Compreender o uso das turbinas a vapor na geração de eletricidade;
- Comparar a eficiência das novas tecnologias quando colocadas lado a lado as iniciais.

CAPÍTULO 3

Metodologia

Este trabalho parte de uma revisão bibliográfica. A metodologia fornece uma base sólida para o desenvolvimento deste, permitindo que a pesquisa seja estruturada e fundamentada.

Para a elaboração deste, que é uma revisão de literaturas já existentes, foi definido o tema e seus limites, nesse caso a pesquisa diz respeito apenas aos processos evolutivos da geração de energia elétrica por meio da biomassa do bagaço da cana-de-açúcar no Brasil.

As buscas foram realizadas através do Google Scholar, Periódicos da Capes, Scientific Electronic Library Online (SCIELO) e Elsevier. Alguns livros didáticos, também foram utilizados para aprofundar com segurança alguns conceitos termodinâmicos.

O arcabouço teórico escolhido está interligado a base de dados governamentais, periódicos científicos, livros, teses e outros recursos acadêmicos. Critérios como a atualidade, região dos dados, como é o caso da produção de cana-de-açúcar, pertinência do conteúdo e a contribuição para o tema foram levados em consideração aqui.

Outrossim, palavras chaves como bioenergia, biomassa, gases de efeito estufa e cana-de-açúcar foram de grande valia para esta seleção.

Por fim, foi feita uma análise crítica dos fundamentos e dados selecionados visando a comparação de todo processo evolutivo da bioenergia da cana e discutidas medidas futuras que tornem essa energia ainda mais sustentável.

CAPÍTULO 4

Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica deste estudo consiste em construir um conjunto de informações que estejam diretamente relacionadas aos objetivos gerais e específicos estabelecidos.

4.1 Bioenergia no Brasil, Uma Energia Verde

A chegada da cana-de-açúcar no país data à época do Brasil Colônia, isso porque os portugueses viram nestas terras férteis uma oportunidade de expandirem seus negócios. Com o passar dos anos a produção açucareira foi se intensificando, já que a demanda mundial era crescente e de modo exponencial. Além do açúcar, por meio do caldo da cana, também era possível obter alguns destilados como a cachaça e etanol (BRAIBANTE et al., 2013a).

Em relação ao etanol como fonte energética, no Brasil, sua produção é iniciada somente no final do século XIX. Inúmeros fatos mundiais de larga escala contribuíram para o avanço da produção de etanol no país. Por exemplo, o avanço da Primeira Guerra Mundial (1914 a 1918) demandava mais combustível para alguns dos motores utilizados durante as batalhas. A primeira intervenção do Estado, na produção de etanol no Brasil, ocorreu já no início do século XX, com a previsão de adição de 2% de álcool a gasolina (CORTEZ; LORA; GOMEZ, 2008)

Na sequência, com o advento de crises mundiais e os elevados preços do petróleo, a dependência do Brasil, que na época era mais de 80%, tornou-se um peso econômico exorbitante. Entre outubro de 1973 e março de 1974 o valor do petróleo aumentou em 400%, causando grandes reflexos na economia global Junior (2013), com isso, em busca de uma solução foi implantado pelo governo federal da época o Programa Nacional do Álcool (PROÁLCOOL), que estabelecia uma adição de 10% de etanol na gasolina, o que de modo indireto incentivava motores a combustão do etanol nos veículos.

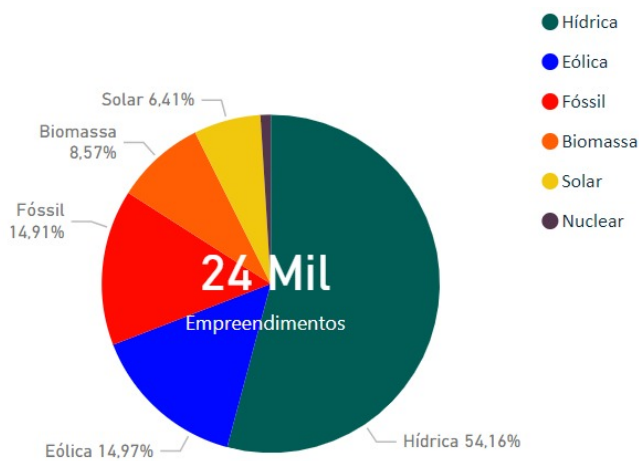
Segundo Gimenez et al. (2018) em 10 anos (1975-1985) o percentual de cana processada para a produção de etanol subiu de 10% para 70%. Isso porque a junção das destilarias de álcool

às usinas de açúcar já existentes garantiram o aumento da produção de etanol sem prejudicar a produção açucareira. Com o aumento da produção, as indústrias sucroalcooleiras foram notando a necessidade de melhoria nos processos de produção, bem como a padronização de algumas etapas. Nesse sentido, foram desenvolvendo novas tecnologias, equipando cada vez mais os laboratórios e incentivando pesquisas nesse ramo.

O grau de independência energética do país determina o grau de desenvolvimento econômico, social e ambiental e, nesse contexto, o Brasil se destaca por ser pouco dependente de combustíveis fósseis para a geração de energia elétrica (CASSULA et al., 2015). De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 2019, quase todos os domicílios do país tinham acesso à energia elétrica, cerca de 99,8%, fornecida pela rede geral ou por fontes alternativas.

O advento dos avanços tecnológicos no ramo da eletricidade, associados ao enorme espaço territorial brasileiro, bem como, aos interesses políticos, tornaram o Brasil uma potência mundial na geração de energia elétrica. A ANEEL (2024) aponta que a participação das fontes renováveis na matriz elétrica do Brasil, conforme a 1, é próxima de 85%, dos quais aproximadamente 55% correspondem à fonte hidráulica, 8% a biomassa, 15% à eólica e 6% solar. Em 2019, a biomassa já constituía a terceira fonte mais importante na oferta interna de energia no Brasil, ao considerar a produção para a rede juntamente com a produção para o autoconsumo (ALMEIDA, 2022).

Figura 1 – Matriz elétrica do Brasil por combustível.



Fonte: ANEEL (2024).

Nas últimas décadas surgiram inúmeros investimentos na evolução sustentável da matriz elétrica do Brasil. Isso ocorre por diversos fatores, como por exemplo, devido a hidráulica ser a fonte mais utilizada, longos períodos de estiagem afetam de modo significativo a geração, o que reflete diretamente nos consumidores. A bioenergia não é uma alternativa capaz de solucionar totalmente o problema energético, mas tem o potencial de substituir parcialmente os combustíveis fósseis (GOLDEMBERG, 2008). Além disso as usinas sucroalcooleiras, ao quei-

mar biomassa proveniente da cana-de-açúcar, o bagaço, garantem uma eficiência ainda maior na produção de energia limpa, indo além do biocombustível etanol.

A produção simultânea de eletricidade na indústria sucroalcooleira passou por diversas fases, autoconsumo inicial expansão da capacidade para comercialização, integração com a rede elétrica nacional, modernização tecnológica e otimização para eficiência e sustentabilidade antes de se tornar um empreendimento industrial. O bagaço resultante da produção de açúcar e etanol constituíam um grande obstáculo para as usinas, isso porque o volume de material a ser descartado era imenso o que sempre gerou um problema para o setor (CASSULA et al., 2015).

Apesar de ter uma participação importante na produção de energia do país, não há técnica ou planejamento eficiente para armazenar o bagaço da cana-de-açúcar devido ao seu elevado volume. A quantidade de energia liberada na forma de calor durante a combustão completa da unidade de massa do combustível é a definição de poder calorífico segundo Cortez, Lora e Gomez (2008). Para os autores o poder calorífico do bagaço da cana-de-açúcar pode ser afetado pela má estocagem, e isso ocorre devido a degradação da biomassa bem como à alteração na umidade durante sua estocagem.

Outrossim, os autores citados anteriormente afirmam que o valor quantitativo do poder calorífico pode variar de acordo com o teor de umidade da biomassa. E é possível notar que o bagaço proveniente da moagem da cana-de-açúcar não possui o maior poder calorífico superior. Por isso, para Cortez, Lora e Gomez (2008) o mesmo é utilizado em larga escala por ser a sobra do que já foi utilizado para a produção de insumos derivados da mesma, logo é uma matéria prima que as indústrias sucroalcooleiras possuem a um custo irrisório.

O alto aproveitamento da cana-de-açúcar se dá pois ela é uma das plantas que mais produzem biomassa. Nesse sentido, segundo Leal e Macedo (2004) para cada tonelada de cana processada são gerados, em média, 12 kWh em energia elétrica, 16 kWh de energia mecânica e 330 kWh de energia térmica, na forma de vapor de processo. Os mesmos autores afirmam ainda que estes valores de energia térmica gerados são altíssimos quando comparados à mesma geração em usinas de açúcar de beterraba ou destilarias de álcool de milho.

4.1.1 Cogeração de Energia no Brasil

Segundo NAGAOKA et al. (2007), como o carvão vegetal, derivados do petróleo e biomassa, é denominada cogeração de energia. Em linhas gerais, uma usina sucroalcooleira garante a cogeração ao utilizar um queimador de combustível, geralmente caldeiras que queimam o bagaço da cana-de-açúcar. Silva et al. (2019) esquematiza, conforme a 2, o processo de cogeração básico das usinas de açúcar e álcool. Este processo segue:

1. O bagaço da cana-de-açúcar é queimado na caldeira. Com o calor gerado ocorre a produção de vapor de alta pressão;

2. O vapor gerado é conduzido para as turbinas das moendas, turbinas do gerador de eletricidade bem como aplicação direta ao processo após válvula redutora de pressão. Nas turbinas a energia cinética e térmica do vapor em energia mecânica;
3. A energia mecânica da turbina do gerador se dá pelo acionamento do eixo da turbina, cujo eixo está acoplado a um gerador elétrico. De forma semelhante a energia mecânica para o acionamento das moendas é gerada;
4. Após sair das turbinas, a energia térmica ainda existente no vapor é redirecionado para o processo, ao condensar. Neste processo, pode ocorrer também a existência de vapor que não passou pela turbina, após a válvula redutora de pressão;
5. A água obtida após sua condensação no processo, é bombeada de volta para o reservatório da caldeira, reiniciando assim todo o ciclo. Como não é possível reciclar toda a água do processo, alguma água é adicionada para alimentar a caldeira.

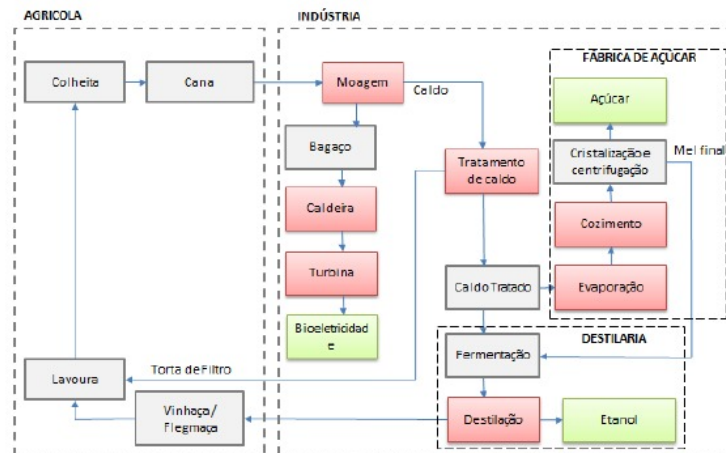
Os sistemas de cogeração se destacam principalmente pela economia nos gastos com infraestrutura de transmissão e distribuição de energia, além da sua notável eficiência na utilização dos recursos energéticos (ENERGIA, 2023). Isso é possível pois, esses sistemas geralmente são instalados próximos ao local de consumo o que reduz a necessidade de investimento em linhas de transmissão de alta tensão e infraestrutura de distribuição. Como também, o mesmo aproveita melhor a energia térmica (calor residual) gerada durante o processo de geração de energia elétrica ao aproveitar o vapor oriundo das turbinas e inserir o mesmo dentro do próprio processo industrial em questão, aumentando assim a eficiência geral do sistema.

Outro destaque no sistema de cogeração nas sucroalcooleiras é a redução de Gases de Efeito Estufa (GEE) uma vez que o processo de conversão de energia é mais eficiente. Barbeli (2015) afirma que dependendo do tipo de combustível utilizado, as emissões podem ser substancialmente reduzidas. Essa eficiência na utilização de recursos energéticos contribui de maneira positiva para a sustentabilidade ambiental, destacando a cogeração como uma alternativa benéfica na busca por práticas mais limpas na geração de energia elétrica.

Para Silva et al. (2019) a prática da cogeração tornou-se fundamental para as usinas de açúcar e álcool, uma vez que não apenas atende às suas demandas por energia térmica e mecânica, mas também utiliza o resíduo proveniente da moagem da cana-de-açúcar como fonte de combustível.

A Figura 2 foi elaborada por Silva et al. (2019) e exemplifica o seguimento dos processo em uma usina sucroalcooleira. No qual aborda desde a colheita da cana-de-açúcar até a destilação do etanol.

Figura 2 – Fluxograma básico de uma usina sucroalcooleira.



Fonte: Silva (2019).

4.1.2 Sistemas de Cogeração nas Sucroalcooleiras

Os primeiros sistemas de cogeração foram implementados globalmente nos primeiros anos do século XX (ENERGIA, 2023). A mesma explica que devido a falta de tecnologia eficiente para grandes centros geradores a produção centralizada de energia elétrica era uma prática incomum. Assim os consumidores frequentemente optavam por instalar suas próprias centrais de geração, já que a tecnologia disponível não abria espaço para a criação de grandes infraestruturas. Fato esse que perdurou até meados de 1940.

Nas últimas décadas, o aumento significativo no mercado de equipamentos e tecnologias voltadas para a geração distribuída abriu diversas oportunidades. Esse cenário atraiu consideráveis investimentos em pesquisa, resultando no surgimento de numerosos fabricantes que, hoje em dia, oferecem tecnologias altamente competitivas para a implementação de sistemas de cogeração.

Barbeli (2015) diz que os sistemas de cogeração podem ser classificados seguindo o fluxo de energia com base na sequência em que geram calor e potência. O mesmo autor afirma ainda que estes sistemas são fragmentados em ciclos *bottoming* e ciclos *topping*. No setor sucroalcooleiro preferencialmente o vapor é empregado em turbinas para inicialmente gerar energia elétrica, e a energia térmica resultante é posteriormente recuperada e aplicada ao processo produtivo dentro da indústria (SILVA et al., 2019). Nesse caso o ciclo utilizado é classificado como *topping*, isso porque em palavras sucintas Silva et al. (2005a) conclui que os ciclos *topping* envolvem a utilização de gases de combustão a temperaturas elevadas para produção de energia elétrica ou energia mecânica. Importante destacar que há viabilidade técnica para a implementação de ciclos *topping* utilizando turbinas a vapor, turbinas a gás, motores de combustão interna ou uma combinação de turbina a gás com turbina a vapor (SILVEIRA, 2009).

Os ciclos *bottoming* envolvem a recuperação direta do calor residual, normalmente li-

berado na atmosfera, para gerar vapor e energia mecânica ou elétrica. Por via de regra, essa tecnologia utiliza turbinas a vapor de condensação ou contrapressão, onde a energia térmica é inicialmente empregada no processo e a energia dos gases de exaustão é aproveitada para a produção de eletricidade ou energia mecânica (BARBELI, 2015). Por estes motivos, esta é a fragmentação mais complexa dos sistemas de cogeração. E, fatores como escala de potência e cuidados operacionais e de manutenção exigentes agravam ainda mais as limitações deste processo (BERG; NOGUEIRA, 1996). Segundo Pruzaesky () essas instalações são encontradas em setores industriais robustos, como a produção de vidro ou manufatura de metais, onde fornos operam em temperaturas extremamente elevadas e o resíduo de calor é então aproveitado.

Vários aspectos precisam ser avaliados ao implementar um sistema de cogeração na indústria sucroalcooleira, incluindo a análise de quatro tipos de potenciais: econômico, de mercado, técnico e termodinâmico (OLIVEIRA; NEVES; WAITMAN, 2017a). Os mesmos autores explicam que o potencial econômico refere-se aos investimentos necessários para garantir um retorno financeiro no menor período de tempo possível. O potencial de mercado é determinado pela demanda do mercado e pela identificação dos destinatários para os quais a energia será produzida. Já o potencial técnico busca identificar a tecnologia mais adequada e eficiente para o sistema. E por fim, o potencial termodinâmico é estabelecido com base em princípios teóricos, independente da tecnologia de conversão, representando assim a quantidade máxima de energia elétrica que pode ser gerada.

4.1.3 Biomassa

Alguns autores têm opiniões formadas a respeito da definição de biomassa, por exemplo, para Malico (2008) no âmbito energético, o termo biomassa refere-se ao material biológico originado de organismos vivos, passível de conversão em energia. Essa matéria engloba produtos e resíduos da agricultura, florestas e indústrias correlatas, bem como a fração biodegradável dos resíduos provenientes de setores industriais e urbanos. Já segundo Mororó (2016) a biomassa é descrita como todo material proveniente da vida vegetal e que pode ser renovado em um intervalo de tempo inferior a 100 anos. A mesma ainda conclui que com a exceção de certas microalgas e materiais com elevado teor de umidade, a biomassa é identificada como uma substância carbonada no estado sólido.

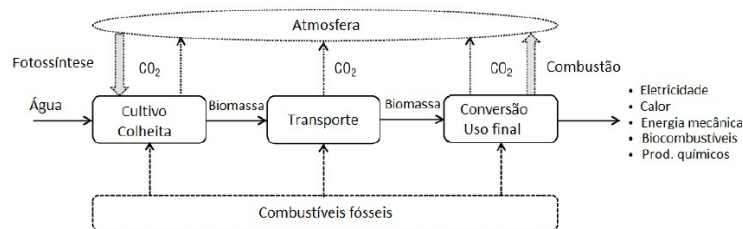
Os tipos de biomassa são diversos e incluem uma vasta variedade de materiais orgânicos que podem ser utilizados para a produção de energia. A mesma autora citada anteriormente, Malico (2008) expõe que diversos exemplos desta vasta variedade empregados na conversão de energia, que incluem: milho, cana-de-açúcar, madeira, palha, casca de arroz, estrume, algas e resíduos biodegradáveis. E, esses tipos de biomassa podem ser utilizados em diferentes processos de conversão, como combustão, gaseificação, fermentação e pirólise, para produzir eletricidade, calor ou biocombustíveis. A escolha do tipo de biomassa muitas vezes depende da

disponibilidade local, dos recursos regionais e dos objetivos específicos de utilização.

Uma das principais vantagens da biomassa é a possibilidade de aproveitamento direto por meio da combustão em fornos ou caldeiras. Para esse processo é possível aprimorar e mitigar os impactos socioambientais através do desenvolvimento de tecnologias de conversão mais eficientes.

Os processos de produção e conversão da biomassa, conforme Figura 3, podem ser resumidos da seguinte forma: a) etapas de cultivo; b) fabricação de fertilizantes e pesticidas; c) combustível em sistemas de irrigação e drenagem; d) operações de colheita; e) transporte das matérias-primas até as instalações de processamento; f) conversão da biomassa em calor e eletricidade (JÚNIOR, 2020).

Figura 3 – Fluxos de carbono no sistema bioenergético.



Fonte: (JÚNIOR, 2020).

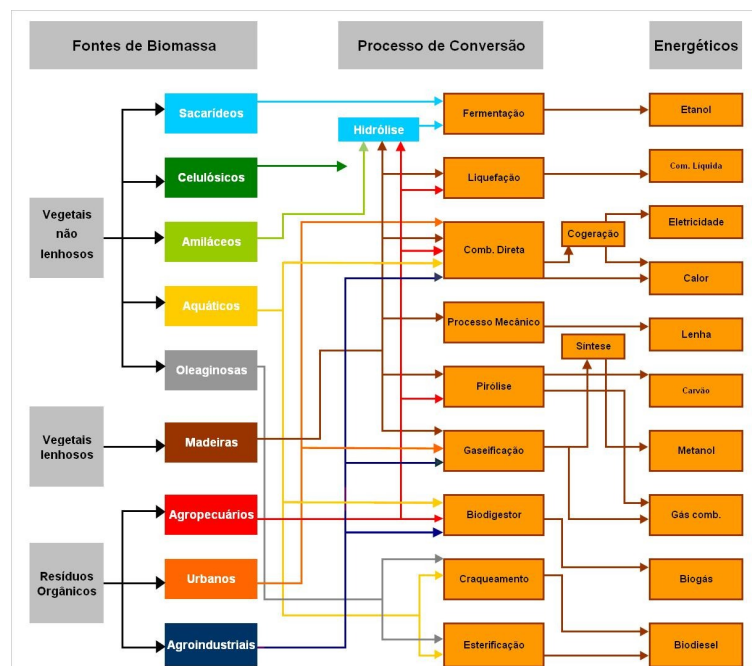
Os métodos de transformação da biomassa em energia apresentam considerável diversidade, sendo a queima direta de biomassa sólida para a produção de energia térmica e elétrica uma das abordagens mais prevalentes. Além disso, uma alternativa para valorizar a biomassa é sua conversão em biocombustíveis. A Figura 4 apresenta o diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa.

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) aponta que em 2018, a geração de energia elétrica derivada de recursos energéticos da biomassa atingiu 54,4 mil gigawatt-hora (GWh), correspondendo a 9% do total de eletricidade produzida no Brasil. E os principais insumos naturais empregados nessa forma de geração foram a biomassa proveniente da cana-de-açúcar e a lixo.

4.1.4 Cana-de-açúcar

Cultivada no Brasil há quase cinco séculos, a cana-de-açúcar foi introduzida por Martin Afonso, administrador colonial português, desencadeando um dos negócios mais bem-sucedidos da história brasileira com produtos derivados desse setor (CARVALHO et al., 2013). Atualmente, a produção de cana-de-açúcar continua a ser uma das principais culturas agrícolas no Brasil. Dado o seu papel crucial nessa produção, o setor de álcool combustível desempenha um papel essencial na consolidação da presença brasileira no mercado energético global (BRAIBANTE et al., 2013b).

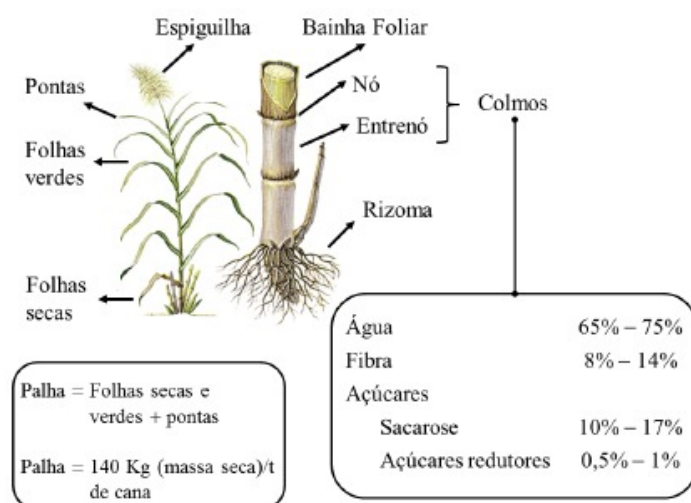
Figura 4 – Diagrama Esquemático dos processos de conversão energética da biomassa



Fonte: Adaptado de BEN (1982).

A cana-de-açúcar é uma planta originária da Ásia e pertence ao gênero *Saccharum* que faz parte da família das gramíneas. Segundo Rodrigues (2012), a parte aérea da cana é constituída por colmos, que contém nós e entre nós onde existe a concentração de sacarose, pelas pontas e folhas que dão origem as palhas e rizomas. O mesmo também cita que a reprodução da cana-de-açúcar ocorre por meio de um tipo de inflorescência fundamental denominada espiguiha Figura 5.

Figura 5 – Estrutura da biomassa da cana-de-açúcar.



Fonte: (RODRIGUES, 2012)

O plantio é uma prática que demanda um profundo entendimento das relações entre solo, planta e atmosfera. A interação entre esses fatores pode ser determinante para o sucesso

ou insucesso de todo o ciclo da cultura, que geralmente abrange um período de cinco a seis anos (BARROS; MILAN, 2010). De acordo com camara (1993) fornecer as condições essenciais para o desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar, incluindo o crescimento radicular e a brotação, correspondente à fase fenológica 1 da cultura, contribui de maneira positiva para o aumento da produtividade e exerce uma influência direta na longevidade do canavial.

COLETI e STUPIELLO (2006) destacam que as principais atividades relacionadas às operações de plantio incluem: o espaçamento entre fileiras; a profundidade do sulco; a época de plantio; a quantidade de mudas e os cuidados necessários associados a essas operações. Os autores ressaltam a importância dessas operações no início do ciclo, enfatizando a necessidade de um planejamento sólido e amplo conhecimento técnico. Isso porque, decisões tomadas nessa fase têm impacto em todo o ciclo da cultura, sendo o processo de plantio notável pelos substanciais custos envolvidos.

Antunes, Lamparelli e Rodrigues (2015) apontam que do plantio até à primeira colheita, a cana-planta pode apresentar um ciclo de desenvolvimento com duração de 18 meses (cana de ano e meio) ou 12 meses (cana de ano), dependendo da época e da região de plantio. E após a primeira colheita, a cana-soca passa a ter um ciclo de 12 meses, e a cada corte ocorre a rebrota da soqueira, iniciando um novo ciclo.

A colheita da cana-de-açúcar é uma operação que envolve a remoção dos colmos maduros para a obtenção da matéria-prima utilizada na produção de açúcar, etanol e outros derivados. Existem diferentes métodos de colheita, e o mais comum é a colheita manual e mecânica. A escolha entre os métodos de colheita depende de diversos fatores, incluindo a tecnologia disponível, o custo da mão de obra, as características do solo e clima, além das preferências e estratégias da usina ou produtor.

A colheita da cana-de-açúcar no Brasil tem passado por uma evolução significativa, migrando do sistema tradicional de colheita manual da cana inteira com queima prévia do canavial para o sistema de colheita mecanizada de cana picada, sem a prática da queima do canavial (CONAB, 2023). O mesmo aponta que a Região Centro-Sul concentra a maior parte da produção nacional de cana-de-açúcar e realiza operações com tecnologia de ponta, principalmente adotando a colheita mecanizada, devido ao seu relevo menos acidentado. Já na Região Norte/Nordeste, onde o relevo é mais acidentado e a mão de obra está mais disponível, o percentual de operações de colheita manual ainda é elevado. O índice nacional de colheita mecanizada é estimado em 88,9%, enquanto o uso da colheita manual representa 11,1%.

Dados expostos pela Bioenergia (2023) apontaram que a moagem de cana-de-açúcar na segunda quinzena de dezembro de 2023 registrou crescimento de 79,87%, na comparação com o mesmo período do ciclo anterior. Foram processadas 4,87 milhões de toneladas contra 2,71 milhões. No acumulado da safra 23/24, a moagem atingiu 644,14 milhões, ante 542,39 milhões de toneladas registradas no mesmo período no ciclo 22/23 avanço de 18,76%.

Tabela 1 – Composição média do bagaço da cana-de-açúcar.

Composição química média	
Carbono	39,7 - 49%
Oxigênio	40-46%
Hidrogênio	5,5-7,4%
Nitrogênio e cinzas	0-0,3%
Propriedades físico-químicas	
Umidade	50%
Fibra	46%
Brix	2%
Impurezas minerais	2%
Composição média da fibra do bagaço	
Celulose	16,6-54,3%
Hemicelulose	14,3-24,4%
Lignina	22,7-29,7%

Fonte: Adaptado de Moraes, Alsina e Gomes (2007).

4.1.5 Biomassa do Bagaço da Cana-de-açúcar

A relevância da cana-de-açúcar reside em sua versatilidade, podendo ser utilizada de diversas maneiras. É empregada diretamente, na forma de forragem, para alimentação animal, ou como matéria-prima na produção de rapadura, melado, aguardente, açúcar e álcool, sendo este último, o biocombustível resultante do processo destilação do mosto, (caldo da cana + água) (MORAIS; ALSINA; GOMES, 2007). Outrossim, o autor ainda completa afirmando a importância econômica de seus resíduos como é o caso do vinhoto e bagaço. E que a composição química do bagaço de cana-de-açúcar varia em função de diversos fatores, incluindo as características do solo, as práticas de colheita e até mesmo os métodos de manuseio. A Tabela 1 apresenta a composição média característica do bagaço de cana, onde a fibra refere-se à matéria seca e insolúvel em água presente na cana-de-açúcar, enquanto o Brix mensura os sólidos solúveis em água.

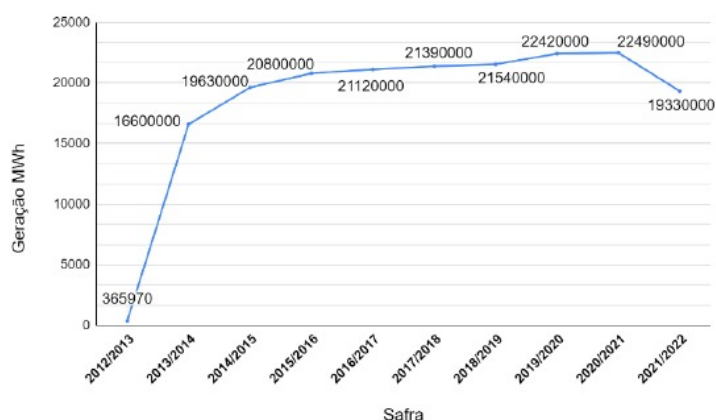
Em média, a composição do bagaço é de 50% de umidade, 48% de fibras e 2% de sólidos solúveis e a cada tonelada de cana-de-açúcar moída, após a extração do caldo, obtém-se aproximadamente 250 kg de bagaço (LOBO, 2013). Para fins de referência, a autora explica que 1 barril de petróleo equivale a 1386×10^{10} kcal e, portanto, em termos energéticos, 1 tonelada de cana-de-açúcar é comparável a 1,2 barris de petróleo. Pelo qual aproximadamente 628.000 kcal vem do açúcar, 618.000 kcal do bagaço e 528.000 kcal da palha Cruz (2023).

O Brasil ocupa a posição de principal produtor global de cana-de-açúcar, alcançando uma produção de 633 milhões de toneladas em uma extensão de cerca de 9 milhões de hectares, sendo que a região centro-sul contribui com 92% desse total. A principal aplicação do bagaço é

na cogeração de eletricidade. Atualmente, a geração de energia elétrica proveniente do bagaço (e em menor escala da palha) é uma das principais fontes de bioeletricidade no país, desempenhando um papel crucial na receita do setor sucroenergético brasileiro (BIORRENOVÁVEIS, 2023).

O comportamento da produção de bagaço está diretamente vinculado ao processo de cultivo e processamento da cana-de-açúcar, isso se dá pois respectivamente o primeiro é um subproduto do segundo. Por meio de dados expostos pelo Observatório da Cana (2022), Almeida (2022), verificou um crescimento inicial na produção de bagaço na primeira década dos anos 2000, seguido por variações ao longo do período de produção. Essas variações na produção de energia por meio da cana de açúcar pode ser analisada no gráfico que segue na Figura 6.

Figura 6 – Geração de bioeletricidade a partir do bagaço da cana para a safra 2012/2013 até a safra 2021/2022.



Fonte: (ALMEIDA, 2022)

A mesma autora explica que, observou-se um aumento na produção de bioeletricidade entre as safras 2013/2014 e 2020/2021, indicando que a produção de bioeletricidade a partir da cana-de-açúcar tem ganhado destaque no Brasil ao longo dos anos, apresentando um crescimento anual. A queda apresentada no processamento da cana-de-açúcar entre as safras de 2020/2021 reflete a variação da produção e do processamento da cana de açúcar (e do bagaço) no período de pandemia do COVID-19.(ALMEIDA, 2022)

Com relação a estocagem do bagaço, Santos et al. (2011) afirma que é comum que um trator de esteira distribua-o no de modo desordenado em pilhas, que podem atingir dimensões de até 300 metros de extensão, 100 metros de largura e 40 metros de altura, o que equivale a cerca de 80.000 toneladas de bagaço. Ainda segundo o autor, apesar de ser economicamente relevante como fonte de energia, a estocagem do bagaço de cana atualmente carece de técnicas específicas ou planejamento adequado. Esse cenário resulta no envelhecimento desordenado do estoque nas pilhas, uma vez que o depósito ocorre de maneira aleatória, sem controle do tempo de armazenamento. Durante esse processo de estocagem, a fermentação provoca elevadas

temperaturas no interior das pilhas, atingindo aproximadamente 60 °C, contribuindo para a decomposição do material.

Diante da crescente demanda pela utilização dos resíduos oriundos da moagem da cana de açúcar no setor sucroenergético, a estocagem deste muitas vezes representa um impasse difícil de ser contornado. Isso porque a mesma é afetada por diversos fatores, como o local de armazenamento da biomassa, a temporada do ano, mudanças climáticas e o tipo de composição da biomassa (LOBO, 2013). A autora ainda afirma que o período de estocagem da biomassa deve ser adequado para diminuir o teor de umidade do bagaço da cana-de-açúcar sem resultar na perda de massa seca, uma vez que esta última é essencial para a geração de energia.

A maior parte da secagem ocorre nos primeiros meses de estocagem, contudo, se o período de armazenamento se prolongar além de um intervalo predefinido, a umidade nas palhas pode aumentar devido à quebra da estrutura lignocelulósica, composta por frações de celulose, hemiceluloses e lignina (RODRIGUES, 2012). O impacto primordial da umidade na biomassa é a redução do poder calorífico do combustível, resultando na diminuição da quantidade de energia gerada pelo mesmo.

Nesse contexto, é necessário submeter o bagaço de cana a um processo de beneficiamento que permita sua estocagem de forma eficaz, melhorando, assim, sua utilização como insumo energético ou matéria-prima industrial (SANTOS et al., 2011).

4.2 Análise do Ciclo de Vida (ACV)

O aquecimento global é um fenômeno climático de grande alcance, caracterizado pelo aumento da temperatura média da superfície global, sendo este causado por fatores internos e/ou externos (MOREIRA et al., 2022). Quando relacionado aos fatores internos, o aquecimento se dá por acontecimentos climáticos desordenados e complexos, ou seja, estes são fatores incontrolláveis do ponto de vista humano, por exemplo a atividade vulcânica. Já os fatores externos, citados anteriormente, são oriundos das ações humanas, nesse sentido são associados a este a emissão de gases de efeito estufa (GEE) proveniente da queima de combustíveis fósseis, ou seja a combustão dos derivados do petróleo entre outros.

O maior responsável pelo aquecimento do globo terrestre nas últimas décadas é o aumento desproporcional nas concentrações de GEE de origem antropogênica. A crescente preocupação das consequências oriundas do aquecimento global desordenado e principalmente quando relacionadas às mudanças climáticas decorrentes do uso de combustíveis fósseis na geração de eletricidade e na mobilidade estão impulsionando a busca por fontes de energia renováveis e limpas para substituir ou pelo menos amenizar os efeitos das não renováveis. Assim, a produção e utilização de biocombustíveis, como também o uso de biomassa para a geração de eletricidade tem ganhado força dentro dos centros de pesquisa e desenvolvimento relacio-

nados à sustentabilidade. É importante determinar se o combustível proposto é realmente uma alternativa que reduz a emissão de poluentes, não só durante a utilização propriamente dita (combustão), mas também durante sua produção, manipulação e transporte (CORTEZ; LORA; GOMEZ, 2008).

Análise do Ciclo de Vida (ACV) é a ferramenta que permite quantificar de forma abrangente e objetiva os impactos ambientais de uma atividade ou produto. Definida pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (HAES; ROOIJEN, 2005), a ACV refere-se às consequências ambientais de um produto ou serviço desde sua origem até sua disposição final, isto é, do berço ao túmulo. Nessa metodologia os impactos ambientais de um processo são calculados a partir de um inventário dos fluxos de massa e de energia nele presentes, ao se relacionar o quanto determinado consumo ou descarte está impactando ao meio ambiente, seja na terra, ar ou água. (JÚNIOR, 2020).

Ainda segundo Júnior (2020), no contexto do impacto ambiental, especialmente em relação ao aquecimento global, a geração de GEE é quantificada e expressa em termos de dióxido de carbono equivalente (CO_2eq). Isso porque, este representa uma medida, métrica, aceita internacionalmente que utiliza a comparação entre as emissões de vários gases de efeito estufa baseado no potencial de aquecimento global de cada um. Por exemplo, o gás metano (CH_4) possui um valor 21 vezes maior do que o gás carbônico (CO_2), assim, utiliza-se o conceito de dióxido de carbono equivalente para expressar o impacto do metano, logo o CO_2eq para o CH_4 é de 21.

Durante a produção da bioenergia, oriunda da cana-de-açúcar, ocorre a queima do bagaço com ou sem a palha dentro de caldeiras. Assim, o vapor gerado por esta máquina térmica movimenta turbinas gerando assim a eletricidade. Todo processo de combustão libera dióxido de carbono (CO_2) e nesse caso não é diferente. Por meio de estimativas obtém-se que para cada MW de energia obtida através do sistema de cogeração são emitidos 0.268 toneladas de (CO_2) (SEGUNDO, 2015). Para o Brasil, que representa um dos maiores produtores de eletricidade, por meio da queima do bagaço da cana, estes números são de grande importância pois gera um alto impacto ambiental. Assim fazem-se necessários aperfeiçoamentos tecnológicos contínuos com a finalidade de melhorar o grau da AVC perante a produção da bioenergia.

4.2.1 Análise do Ciclo de Vida como Ferramenta

O estudo de (JÚNIOR, 2020) afirma que a Ecologia Industrial (EI) introduziu uma abordagem inovadora ao desenvolvimento industrial, concebendo a atividade industrial não mais como um sistema isolado, mas como parte integrante de um sistema mais amplo. Esse novo paradigma forneceu ferramentas para a quantificação e, quando necessário, a intervenção nos impactos desse desenvolvimento, oferecendo suporte à implementação de políticas mais sustentáveis. A mensuração dos potenciais impactos ambientais, destinada à avaliação e intervenção,

foi criada para auxiliar na implementação dessas políticas. O mesmo ainda conclui que uma ferramenta fundamental e bem estabelecida da Ecologia Industrial para a quantificação de impactos ambientais é a ACV.

Essa avaliação engloba desde a extração da matéria-prima até o uso final da bioenergia, considerando todas as etapas intermediárias, como transporte, processamento e geração de energia. Essa técnica possibilita a identificação quantitativa das interações do ciclo de vida do produto com o meio ambiente, permitindo a avaliação dos impactos ambientais associados a essas interações (SILVA et al., 2005b).

4.2.2 Metodologia da ACV no Brasil

Chehebe (1997) afirma que cada produto, independentemente do material do qual é feito, seja madeira, vidro, plástico, metal ou qualquer outro elemento, gera um impacto no meio ambiente. E isso ocorre tanto devido ao seu processo de produção, às matérias-primas consumidas quanto ao seu uso e descarte final.

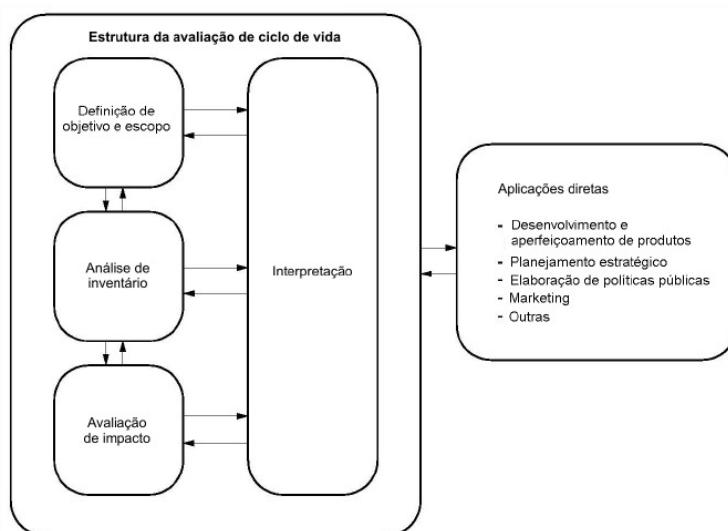
Devido à necessidade de padronização na metodologia da ACV, a Organização Internacional de Normalização, conhecida como International Standards Organization (ISO), tem desempenhado um papel crucial. A ISO desenvolve normas e relatórios técnicos no âmbito da série ISO 14000, destinada ao Gerenciamento Ambiental, essas normas têm como objetivo estabelecer princípios e disseminar as melhores práticas na aplicação dos conceitos de ACV (GRISOLI, 2011).

De acordo com a norma NBR ISO 14040 (ABNT 2009) a metodologia de realização da ACV, estipula que o estudo dessa ferramenta deve abranger quatro fases principais, conforme evidenciadas na Figura 7, que são objetivo e escopo, análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV), avaliação de impactos ambientais e interpretação.

A norma citada define essas fases:

- **Objetivo e escopo** - Declarada a precisão do estudo, assim como as informações necessárias para sua condução e a metodologia para a interpretação de seus resultados. Outrossim, é necessário esclarecer para quem os resultados do estudo serão comunicados;
- **Análise do inventário** - Refere-se a um inventário dos dados de entrada/saída associados ao sistema em estudo. Esta fase engloba a coleta dos dados necessários para atingir os objetivos do estudo em questão;
- **Avaliação do impacto** - Análise dos dados compilados pelo ICV e fornecer informações adicionais para auxiliar na avaliação dos resultados do ICV de um sistema de produto, visando a um melhor entendimento de sua importância ambiental;

Figura 7 – Fases da metodologia ACV.



Fonte:

- **Interpretação dos resultados** - A fase final do procedimento de ACV, na qual os resultados de um (ICV) e/ou de uma Análise de Inventário do Ciclo de Vida (AICV), ou de ambos, são resumidos e discutidos como base para conclusões, recomendações e tomada de decisão, de acordo com a definição de objetivo e escopo.

4.2.3 Software para ACV

A ACV é uma abordagem complexa que demanda a coleta de uma grande quantidade de dados, além de exigir um investimento significativo em termos de tempo e recursos. Assim, o uso de software especializado é fundamental para realizar de maneira eficiente e precisa essa análise complexa e abrangente que é a ACV.

A implementação da ACV por meio de software oferece diversas vantagens, tais como a automação de cálculos complexos, a gestão eficiente de grandes volumes de dados, a padronização dos procedimentos metodológicos e a visualização gráfica dos resultados. Essas ferramentas são desenvolvidas para orientar os usuários nas diferentes etapas da ACV, desde a definição de objetivos e escopo até a interpretação dos resultados.

De maneira geral, segundo EnCiclo (2015), os softwares compreendem bancos de dados contendo informações abrangentes sobre diversos processos produtivos, incluindo matérias-primas, energia, transporte e resíduos. Esses dados estão disponíveis para os usuários, permitindo a criação de sistemas de produto. O usuário pode selecionar processos específicos e relacioná-los às categorias de impacto ambiental de seu interesse. Após a realização dos cálculos por meio de modelos de caracterização, o software apresenta os valores de impacto ambiental do produto para cada uma das categorias escolhidas.

Uma pesquisa realizada por Ribeiro (2009) apontou a existência de 35 principais softwa-

res para análise do ciclo de vida disponíveis na época. O autor identificou que do total, 29 foram desenvolvidos por países europeus. Esses resultados indicam o notável interesse das entidades europeias em relação aos estudos sobre acv (GRISOLI, 2011).

Recentemente, um estudo divulgado por Domênico, Silva e Ribeiro (2021) reforçou a relevância do emprego de softwares para o propósito mencionado anteriormente. Além disso, destacaram a existência de 12 softwares contemporâneos com essa finalidade.

Os estudos citados destacaram os principais softwares relacionados a ACV três deles, (BEES, GABI e HUMBERTO) foram citados em ambos os estudos mesmo com um grande período entre as publicações. Isso destaca a preocupação e importância que este tema tem a seus desenvolvedores.

BEES foi desenvolvido pelo National Institute for Standards and Technology, a ferramenta é utilizada para avaliar os desempenhos ambiental e econômico de produtos do setor da construção civil e seu banco de dados inclui informações de 230 produtos Domênico, Silva e Ribeiro (2021). Para Ribeiro (2009) este visa dar apoio a tomada de decisão de designers, construtores e fabricantes de produtos.

Gabi é uma ferramenta computacional com versões adaptadas para diversas finalidades, destinada à avaliação dos aspectos ambientais, sociais e econômicos relacionados ao ciclo de vida de produtos ou serviços. Inclui um abrangente banco de dados global, incorporando informações do *ecoinvent*. Proporciona suporte para gerenciar volumes extensos de dados e para a modelagem do ciclo de vida de produtos (RIBEIRO, 2009).

Software de gestão ambiental utilizado para visualizar fluxos de materiais e energia, HUMBERTO. Seu emprego nas empresas tem como principais metas identificar pontos críticos para aprimorar os processos no sistema de produção, diminuir a utilização de recursos de materiais e energia, bem como minimizar as emissões poluentes, resultando, por conseguinte, na redução de custos. (RIBEIRO, 2009).

4.2.4 ACV no Setor Sucroenergético

A ACV no setor sucroenergético desempenha um papel fundamental para analisar e quantificar os impactos ambientais associados à produção de açúcar e etanol a partir da cana-de-açúcar. Considerando diversos fatores como o uso de recursos naturais, emissões de gases de efeito estufa e consumo de água, entre outros. Essa metodologia desempenha um papel crucial ao identificar oportunidades de aprimoramento na eficiência ambiental dos processos, orientando esforços em prol de práticas mais sustentáveis e alinhadas com princípios de responsabilidade ambiental.

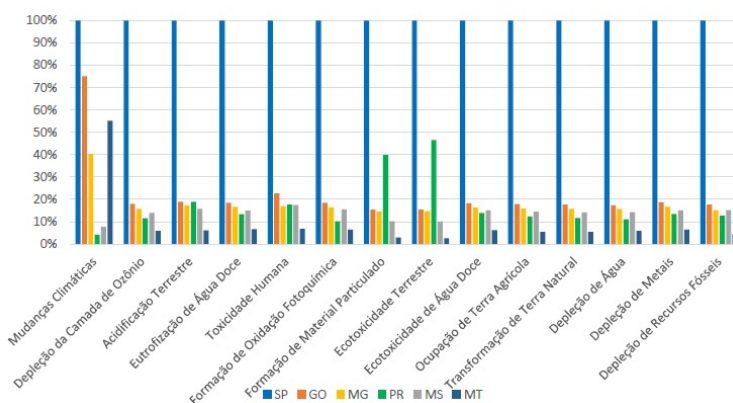
Picoli et al. (2016) realizaram estudos na região Centro-Sul do Brasil que considerou a elaboração de inventários da produção de cana-de-açúcar, bem como, gerar o perfil ambiental

dos sistemas típicos desta região. Os procedimentos incorporados nos sistemas de produto compreenderam a fabricação de insumos agrícolas, atividades agrícolas e cultivo de cana-de-açúcar.

Os autores consideraram que um sistema de produção de ciclo médio de cinco cortes é composto pelas seguintes etapas, convertidas em área: implantação ou reforma do canavial; cultivo de cana planta; e cultivo de cana soca. E os cálculos de emissões foram estimados com base em modelos da literatura científica adequados para as condições brasileiras. Importante destacar também a utilização do software de apoio o *SimaPro* versão 8.1.1.16 e a base de dados *Ecoinvent* versão 3.1.

Dentre as conclusões obtidas destacam-se a influência do manejo agrícola, das características do solo e do clima no desempenho ambiental de diferentes regiões. Fatores como produtividade, porcentagem de colheita mecanizada, uso de fertilizantes e resíduos industriais impactaram significativamente categorias ambientais como Toxicidade Humana, Formação de Material Particulado e Ecotoxicidade de Água Doce. A contribuição de cada Estado da região centro-sul do Brasil é ilustrada pela Figura 8. A estimativa das emissões de fósforo foi crucial para a categoria de Eutrofização de Água Doce, embora ainda exija aprimoramentos. Em resumo, a elaboração de inventários de ciclo de vida regionalizados mostrou-se fundamental para a avaliação precisa dos impactos ambientais da produção de cana-de-açúcar (PICOLI et al., 2016).

Figura 8 – Impactos ambientais da produção de cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil.



Fonte: (PICOLI et al., 2016)

Outrossim, Pereira (2014) buscou avaliar o potencial e os custos associados à mitigação de GEE em alternativas voltadas para o aproveitamento integral da cana-de-açúcar no Brasil. A pesquisa foi baseada em uma usina com capacidade de moagem de 4 Mt cana/ano. A instalação contava com um sistema de cogeração de alta pressão (65 bar/480°C) que utilizava os resíduos provenientes da cana-de-açúcar. E esse sistema tinha capacidade de produzir 32 kWh/tc de eletricidade excedente, utilizando turbinas de contrapressão.

A autora fez algumas considerações importantes como, por exemplo, que o valor médio de material lignocelulósico utilizado foi de 140 kg/tc de palha e 362 mil toneladas por ano de

bagaço excedente. Na Tabela 2 encontram-se as características da biomassa da cana-de-açúcar, bem como a composição do bagaço referentes a este estudo.

Tabela 2 – Características do material lignocelulósico da cana-de-açúcar e Composição

	Bagaço	Palha
Análise imediata (% em peso, base seca)		
Carbono fixo	18	12,8
Material volátil	79,8	83,3
Cinzas	2,2	3,9
Umidade (% , base úmida)	50	15
Análise elementar (% em peso, base seca)		
Carbono	45,6	46,1
Hidrogênio	5,9	6,2
Oxigênio	45,5	43,1
Nitrogênio	0,6	0,6
Enxofre	0,1	0,1
PCS (MJ/kg)	18,1	17,4
PCI (MJ/kg)	7,2	13,3
Composição do Bagaço		
Glucana	39,5	3,5
Xilana	21,9	20,5
Lignina	25,1	17,9
Acetato	3,4	5,6
Proteína	<0,1	2,3
Extrativos	4,6	8,4
Arabinana	1,8	3,5
Galactana	0,7	1,1
Manana	0	0,5

Fonte: Adaptado de Pereira (2014).

Por meio deste estudo a autora concluiu que a peletização, que é a compactação de materiais em pequenos cilindros, possui alto potencial de redução de GEE (23 t $CO_2eq/ha.a$) a um preço mínimo de venda de carbono negativo (-7 R\$/t CO_2eq). Além disso, há opções tecnológicas que convertem a biomassa da cana-de-açúcar em produtos de maior valor econômico com uma alta eficiência ambiental (PEREIRA, 2014).

No estudo de Garcia e Sperling (2010) intitulado Emissão de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol: estimativa nas fases de agricultura e industrialização em Minas Gerais o foco foi analisar as fases ou processos que apresentam as maiores emissões de GEE durante o cultivo e a industrialização da cana-de-açúcar para a produção de etanol, com ênfase nas destilarias localizadas em Minas Gerais.

Neste foram aplicados princípios da metodologia de ACV e foram levadas em conta somente as emissões de CO_2 , CH_4 e N_2O que são os grandes impactantes na geração GEE nesta agroindústria. Dentre os principais resultados, conforme mostra a Tabela 3, os autores apontaram que as emissões GEE durante as etapas agrícolas e industriais da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar são principalmente atribuíveis à queima da planta, ao consumo de combustíveis, à liberação de N_2O no solo e ao uso de cal e fertilizantes.

Tabela 3 – Emissão de gases de efeito estufa (GEE) na agricultura e industrialização da cana-de-açúcar.

Categoria	Emissão de GEE (kg CO₂eq/ha.ano)	Contribuição de cada categoria ao total de emissões (%)
Consumo de combustível	337,18	21,9
Operações agrícolas	69,77	-
Transporte de insumos	17,28	-
Fertirrigação	30,2	-
Colheita, carregamento e transporte	219,93	-
Consumo de cal e fertilizantes	298,38	19,38
Consumo de defensivos agrícolas	30,39	1,97
Queima do canavial/palhiço	434,31	28,21
N ₂ O liberado no solo	331,52	21,53
Produção de mudas	72,81	4,73
Produtos químicos etapa industrial	35,01	2,27
Total	1.539,60	100

Fonte: Adaptado de Juan e Eduardo (2010).

De encontro aos autores citados neste tópico, uma revisão de literatura realizada em Ponce (2019) foi identificado cinco principais conclusões a respeito da ACV da cana-de-açúcar.

- A maior parcela das emissões ao meio ambiente ocorre na fase agrícola da produção sucroenergética;
- As principais fontes de emissão foram os combustíveis fósseis, principalmente diesel, e os fertilizantes;
- A eliminação da queima antes da colheita da cana-de-açúcar traz benefícios ambientais;
- O emprego da vinhaça na agricultura e o aproveitamento da palha para cogeração, juntamente com o aumento da produtividade, foram identificados como potenciais meios de redução de impactos.

Dessa forma, considerando as perspectivas proporcionadas pelos métodos de avaliação do ciclo de vida, visando otimizar o aproveitamento energético do ciclo de vida da cana-de-açúcar, recomenda-se a utilização da cana crua no processo industrial e a destinação da palha para a cogeração de energia, em conjunto com o bagaço (PRADO, 2007).

4.3 Geradores de Vapor na Indústria Sucroalcooleira

Os geradores de vapor desempenham um papel de suma importância quando relacionados à evolução técnica e ambiental na geração de bioenergia nas sucroalcooleiras. Isso porque esse equipamento é parte fundamental do processo, o que impacta diretamente na eficiência energética bem como nas emissões de gases para a atmosfera.

Os geradores de vapor mais utilizados nas indústrias sucroalcooleiras são as caldeiras alimentadas pelo bagaço da cana-de-açúcar, isso se dá pois garantem a cogeração de eletricidade. Lorensetti (2022) diz que o calor gerado pela queima do bagaço é transferido para a água circulante na caldeira, transformando-a em vapor superaquecido. Esse vapor é então direcionado para turbinas, que convertem a energia térmica em energia mecânica, e, por fim, para geradores elétricos, onde é convertida em energia elétrica utilizável. Assim, a queima do bagaço gera o vapor necessário para impulsionar o ciclo de geração de eletricidade.

No ramo das indústrias sucroalcooleiras o vapor começou a ser utilizado segundo Hugot (1969) por volta de 1947 para o acionamento de moendas, ou seja, para moer a cana de açúcar e essa nova utilização para a época teve resultados satisfatórios. Isso porque quando comparado ao acionamento elétrico, o mesmo possui maior eficiência em termos de consumo de energia, permite ampla variação na velocidade de cada moenda individualmente sem que haja perda significativa de rendimento, bem como ocupa espaços físicos menores e pouca supervisão para manutenção. O mesmo autor afirma ainda que essas vantagens fizeram com que houvesse uma elevada popularização das moendas a vapor na época.

Esse tipo de equipamento surgiu da necessidade de haver substituição do carvão na geração energética do meio industrial, pois na época, por volta do início do século XVIII o carvão era a principal fonte de energia nos processos industriais.

A necessidade de melhorias fez com que as indústrias procurassem otimizar o desempenho das caldeiras, aumentando sua capacidade de produção de vapor e reduzindo as perdas de energia. Nesse sentido, os novos projetos têm buscado aprimorar diversos aspectos das caldeiras, incluindo o design interno, a geometria dos tubos, os sistemas de distribuição de água e vapor, entre outros.

Com o desenvolvimento global e o agravamento das questões climáticas, a sustentabilidade dos processos industriais ganharam força. Estudos e novos projetos foram sendo desenvolvidos para otimizar o processo de produção nas indústrias. Diversos tipos de caldeiras têm sido projetadas para realizar a queima de combustíveis alternativos, entre essas fontes de energia, a biomassa tem se destacado como um das principais fontes renováveis para o futuro da geração energética. Esses novos projetos desenvolveram a capacidade das caldeiras utilizarem matérias orgânicas renováveis, e é nesse momento que o bagaço da cana-de-açúcar ganha destaque. Já que este material, antes utilizado para outros fins ou mesmo refogado pelas sucroalcooleiras, pôde ser reaproveitado garantindo assim um enorme reaproveitamento de sua energia ainda disponível no bagaço, composto basicamente por celulose, hemicelulose e lignina (MORAIS; ALSINA; GOMES, 2007).

4.3.1 Caldeiras

Pela necessidade de se encontrar alternativas na geração de calor, surgiram as máquinas destinadas a gerar vapor e nos dias atuais, pela grande praticidade e versatilidade de sua utilização, o vapor d'água tornou-se indispensável em diversos setores industriais. (MORAES; JUNIOR, 2018). USINAS (2008) afirma que a caldeira desempenha o papel de fornecer o vapor necessário para acionar as palhetas da turbina.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018) utiliza da Norma Regulamentadora NR-13 para definir caldeira nas seguintes palavras: equipamento destinado a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, projetados conforme códigos pertinentes, excetuando-se refratedores e similares.

A respeito desses geradores de vapor, Mororó (2016) conceitua alguns dos principais componentes sendo:

- Cinzeiro: em caldeiras de combustíveis sólidos, é o local onde se depositam as cinzas ou pequenos pedaços de combustível não queimado;
- Fornalha: com grelha ou queimadores;
- Seção de irradiação: são as paredes da câmara de combustão revestidas internamente por tubos de água;
- Seção de convecção: feixe de tubos de água, recebendo calor por convecção forçada; pode ter um ou mais passagens de gases;
- Superaquecedor: trocador de calor que aquecendo o vapor saturado transforma em vapor superaquecido.;
- Economizador: trocador de calor que através do calor sensível dos gases de combustão saindo da caldeira aquece a água de alimentação;
- Pré-aquecedor de ar: trocador de calor que aquece o ar de combustão também trocando calor com os gases de exaustão da caldeira;
- Exaustor: faz a exaustão dos gases de combustão, fornecendo energia para vencer as perdas de carga devido a circulação dos gases;
- Chaminé: lança os gases de combustão ao meio ambiente, geralmente a uma altura suficiente para dispersão dos mesmos.

A autora ainda destaca que a caldeira ideal inclui:

- Simplicidade na construção, excelente acabamento, materiais conducentes, manutenção de baixo custo, alta eficiência e alta disponibilidade;
- Concepção e construção ideais para acomodar a expansão e contração dos materiais;
- Uma fornalha de configuração favorável à combustão eficiente e que permita a máxima taxa de transferência de calor;
- Capacidade de resposta às demandas súbitas e condições adversas.
- Acessibilidade para a limpeza e manutenção;
- Tenha um fator de segurança que atenda às exigências.

Em relação às fornalhas, estas podem ser classificadas de duas maneiras dependendo de como a combustão é realizada e atendendo às características construtivas da mesma. Em relação ao modo de combustão existem as fornalhas de queima em deposição e em suspensão. Já quando relacionadas segundo as características construtivas elas são divididas fornalhas celulares, de grelha estacionária, de grelha móvel, ciclônica, de leito fluidizado e de queima em suspensão (CORTEZ; LORA; GOMEZ, 2008). As caldeiras de leito fluidizado têm a capacidade de queimar o bagaço de cana em um ambiente controlado, onde o material é suspenso e circula junto com partículas de ar ou gases de combustão. Esse processo permite uma queima eficiente do bagaço de cana e geração de calor e é a mais utilizada quando relacionada a queima do bagaço da cana-de-açúcar para geração de eletricidade.

Os estudos feitos por Moraes e Junior (2018) apontam que a NR-13, que regulamenta caldeiras e vasos de pressão no Brasil, classifica as caldeiras de acordo com sua pressão de operação. Pelo qual expõe que as principais classificações são: Categoria A abrange caldeiras com pressão de operação superior a 1960 KPa (19,98 kgf/cm²). As caldeiras da Categoria C possuem pressão de operação igual ou inferior a 588 KPa (5,9 kgf/cm²). Já as caldeiras da Categoria B são aquelas que não se enquadram nas categorias anteriores.

Essas classificações são importantes para determinar os requisitos específicos de projeto, operação e manutenção aplicáveis a cada tipo de caldeira. A norma também aborda outros aspectos, como inspeções periódicas, documentação técnica, treinamento de pessoal, entre outros, para garantir a segurança na operação desses equipamentos.

Além disso, dentro dessas categorias, as caldeiras podem ser classificadas quanto ao tipo (aquatubulares, flamotubulares, etc.) e ao combustível utilizado, entre outras características relevantes para a segurança operacional. É importante consultar a norma NR-13 para obter informações detalhadas sobre as classificações e requisitos específicos.

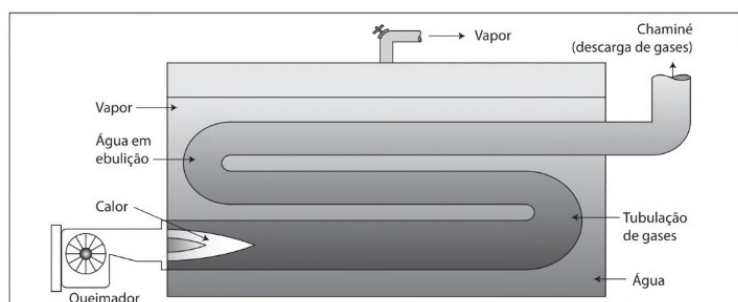
A operação da caldeira de leito fluidizado baseia-se em uma camada de areia ou material similar, na qual o combustível é introduzido e queimado. O ar de combustão é injetado através da camada de areia por aberturas localizadas na parte inferior da caldeira (MACEDO et al.,

2006). Este autor expõe que as caldeiras de leito fluidizado possuem as seguintes propriedades para queima: flexibilidade de combustíveis; alta eficiência de combustão; baixas emissões de NO_x ; controle de emissões de SO_x ; grande faixa de aceitação de partículas combustíveis e instalações relativamente pequenas.

A caldeira flamotubular, também conhecida como tubo-de-fogo ou piro-tubular, recebe esse nome devido aos gases quentes gerados pela combustão na fornalha, que circulam pelos tubos, conforme Figura 9, com esses tubos sendo envolvidos por água (BAGGIO, 2018). O referido autor comenta ainda que apesar de existir caldeiras mais modernas, esse tipo ainda é amplamente utilizado, especialmente em capacidades menores de produção de vapor (em torno de 10 ton/h) e baixas pressões (até 10 bar).

Nessas, as fornalhas são dimensionadas preferencialmente para que todo combustível seja queimado sem que ocorra reversão de chama que possa atingir diretamente os espelhos de caldeira, pois isso interfere na eficiência e vida útil do gerador de vapor.

Figura 9 – Caldeira Flamotubular.



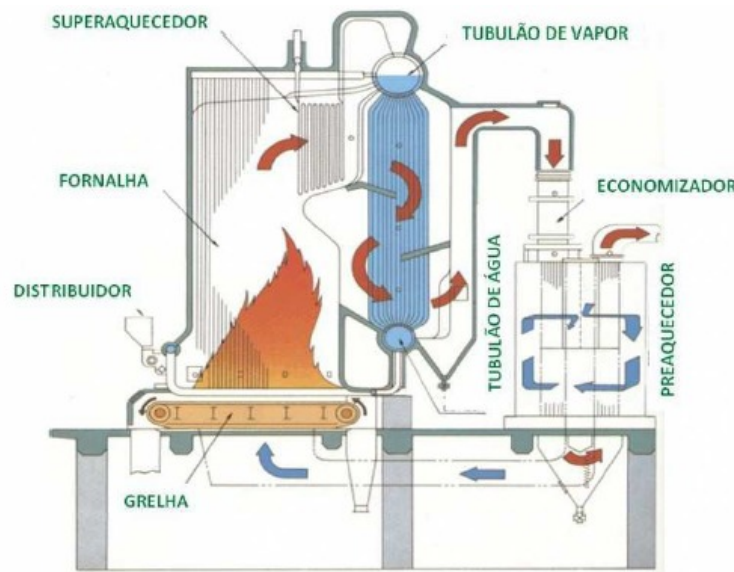
Fonte: (BOTELHO; BIFANO, 2015)

Já as caldeiras aquatubulares tem como principal característica a presença de tubos por onde circula a água, como mostra a Figura 10, que será aquecida externamente pelos gases de combustão (BAGGIO, 2019). O mesmo autor afirma ainda que os tubos podem variar de acordo com as necessidades do processo em que esse tipo de gerador de vapor está inserido, podendo ser retos ou curvos. Além disso, pode ser empregado o uso de bombas para garantir uma eficiência maior na transferência de calor.

As caldeiras aquatubulares são amplamente utilizadas em usinas sucroalcooleiras devido às altas pressões de trabalho, além de não terem um limite físico definido para sua capacidade de produção de vapor, tornando-as adequadas para operar em pressões e temperaturas elevadas. Essa capacidade de operação em condições extremas permite melhorias significativas no rendimento das caldeiras. Ademais, ao operar nessas condições, é possível limitar a formação de vapor úmido na saída da turbina, o que é essencial para o ciclo a vapor utilizado no processo (Rankine).

Atualmente existem caldeiras que produzem até 750 t/h de vapor com pressões de até 350 bar (ARNAO, 2007). A produção de vapor destas, ocorre por meio de dois reservatórios

Figura 10 – Caldeira Aquatubular.



Fonte: (BAGGIO, 2019)

interligados entre si, no qual um é responsável pela separação da fase líquida e do vapor e outro é realizada a decantação da água pura dos sólidos em suspensão. Sua construção exige maiores cuidados e instrumentos, isso faz com que seu valor de mercado seja bem maior quando comparada às flamotubulares (NETO, 2019). E por isso são preferidas somente para maiores capacidades de produção de vapor e pressão, exatamente onde o custo de fabricação do outro tipo começa a aumentar desproporcionalmente.

4.3.2 Caldeiras a Biomassa

Caldeiras a biomassa são equipamentos projetados para utilizar como combustível fontes renováveis como resíduos de madeira, casca de arroz, bagaço de cana-de-açúcar entre outros. O processo de queima da biomassa libera energia térmica, que pode ser aproveitada em processos industriais e/ou para a geração de eletricidade, sendo uma alternativa mais ecoeficiente em comparação com fontes de energia tradicionais.

Järvinen, Alakangas e Energy (2001) afirmam que a combustão direta, gaseificação e pirólise são as tecnologias para a conversão primária de biomassa para geração de calor e eletricidade. Julio Cesar 2006 disserta a respeito dessas tecnologias e expõe que:

- a) Na combustão direta, a biomassa é oxidada com excesso de ar, resultando na geração de gases quentes. Esses gases são então utilizados para gerar vapor nas seções de troca de calor das caldeiras. O vapor produzido desempenha um papel fundamental em processos de geração de eletricidade, podendo ser empregado em ciclos Rankine, seja exclusivamente para a produção de eletricidade em um ciclo de turbina de condensação, ou para geração

simultânea de eletricidade e vapor em processos de cogeração, através de um ciclo de turbina de extração.

- b) Gaseificação é o processo de oxidação parcial da biomassa usando a quantidade abaixo da estequiométrica de oxigênio, geralmente na presença de vapor, com o objetivo de produzir energia para a conversão térmica da biomassa em gases e vapores orgânicos, visando a produção de energia. Esses gases podem ser diretamente alimentados na caldeira ou nas turbinas a gás. Em ciclos de gaseificação indireta e outras fontes externas de calor, além do oxigênio, são empregados para fornecer energia, enquanto vapor de alta temperatura gaseifica as frações orgânicas da biomassa em vapor ou gases;
- c) Na pirólise com aquecimento indireto, também é empregado para transformar a biomassa em uma mistura de gases e vapores orgânicos. A pirólise é definida como a decomposição térmica de materiais orgânicos na ausência de oxigênio. Tecnicamente, a gaseificação indireta é um tipo de pirólise. Quando o produto principal da pirólise é um gás, o processo é classificado como gaseificação. Se os produtos principais são vapores condensáveis, o processo é categorizado como pirólise. Geralmente, vapor não é adicionado ao processo de pirólise.

Outrossim, e de modo similar a pesquisa citada acima, um estudo realizado por Kimura et al. (2009) evidencia que dentre os processos térmicos de conversão destacam-se a combustão, gaseificação, liquefação e pirólise. A autora ainda destaca alguns pontos sobre esses processos.

- Combustão - é a maneira mais antiga de utilização da biomassa para fins energéticos; seus produtos são uma mistura dos gases dióxido de carbono, monóxido de carbono, vapor d'água, nitrogênio e oxigênio; a eficiência global situa-se entre 60 e 75%, dependendo do teor de umidade da biomassa, controle do ar e das características da câmara de combustão;
- Gaseificação - processo térmico que converte matérias-primas carbonáceas em uma mistura de gases por meio de reações termoquímicas envolvendo vapor quente, hidrogênio, ar, ou oxigênio em quantidades inferiores à estequiométrica para a combustão; largamente utilizado para a madeira, visando à geração de calor industrial ou a produção de gases combustíveis para utilização em motores através do uso de gasogênios; o gás pode substituir os derivados do petróleo com facilidade em um grande número de aplicações industriais, e em termos energéticos, o processo de gaseificação é tão eficiente quanto a combustão;
- Liquefação - converte materiais carbonáceos em produtos líquidos;
- Pirólise - decomposição térmica de materiais contendo carbono, na ausência de oxigênio, ou em uma quantidade tal que a gaseificação não ocorra totalmente, dando origem a três fases: uma sólida, o carvão vegetal; outra gasosa, não condensável; e por fim uma fase

líquida composta por duas frações, uma aquosa e outra oleosa, comumente designada de fração pirolenhosa.

4.3.3 Emissões nas Caldeiras a Biomassa

As emissões provenientes de caldeiras a biomassa podem variar dependendo de diversos fatores, incluindo o tipo de biomassa utilizada, o design da caldeira, as práticas operacionais e os controles de emissão implementados. Em termos simples, os principais poluentes liberados pelas chaminés das caldeiras a biomassa são partículas finas (PM), óxidos de enxofre (SO_x), compostos orgânicos voláteis (VOC), óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO) e resíduos não queimados, que incluem diversos compostos orgânicos Macedo et al. (2006)

Segundo Brand e Giesel (2017), ano outros poluentes gerados durante o processo incluem metais pesados, compostos orgânicos voláteis e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, sendo estes dois últimos originários da queima incompleta.

Flandoli (2014) classifica os poluentes em duas categorias sendo os poluentes primários e os secundários. Respectivamente são aqueles emitidos diretamente pelas fontes de emissão e aqueles formados na atmosfera pela reação química entre poluentes e componentes naturais da atmosfera. O autor organiza os principais poluentes e seus tempos de permanência na atmosfera conforme Tabela 4. Para ele estes poluentes são consequência da combustão incompleta, e isso ocorre quando não há o fornecimento adequado de oxigênio para permitir a queima completa. Subprodutos estes que são considerados nocivos ao meio ambiente e à saúde humana.

Tabela 4 – Permanência e concentração dos poluentes.

Poluente	Tempo de permanência	Ar limpo (ppm)	Ar poluído (ppm)
SO_2	4 dias	0,0002	0,2
H_2S	< 1 dia	0,0002	-
CO	< 3 anos	0,1	40 - 70
NO/NO_2	5 dias	< 0,0002	0,2
Hidrocarbonetos	-	< 0,001	-
CO_2	2 a 4 anos	340	400
O_3	14 a 21 dias	0,03	0,5

Fonte: Adaptado de Flandoli (2014).

As emissões diretas de CO_2 resultantes da combustão estão relacionadas à quantidade de combustível consumido, à porcentagem de carbono presente no combustível, e a uma pequena porcentagem que permanece sem oxidar, principalmente na forma de material particulado (1%) (ORREGO, 2014). Este autor expôs um comparativo entre alguns combustíveis e suas respectivas emissões de CO_2 . A Tabela 5 exibe o conteúdo de carbono de cada combustível, juntamente com a quantidade de dióxido de carbono liberada na atmosfera.

Tabela 5 – Porcentagem de carbono e emissões diretas.

Combustível	%C_{massa}	Emissão direta (gCO_2/kWh)
Gás Natural	75,30	536,93
Óleo Comb.	87,00	634,83
Nuclear	0,00	0,00
Carvão	59,43	880,95
Eólica	0,00	0,00
Hidráulica	0,00	0,00
Biomassa	22,40	0,00

Fonte: Adaptado de Orrego (2014).

Borges e Arbex (1994) relatam que em relação às emissões que impactam globalmente o meio ambiente, é relevante mencionar que a agroindústria canavieira desempenha um papel significativo na contenção do aumento do CO_2 na atmosfera. Isso ocorre por meio da substituição da gasolina pelo álcool anidro e hidratado, da substituição do óleo combustível pelo bagaço na produção de açúcar, e da utilização do bagaço como substituto do óleo combustível em outros setores industriais. Essa contribuição é abordada pela Tabela 6 em toneladas de carbono por ano.

Tabela 6 – Contribuição da agroindústria canavieira para a redução da taxa de CO_2 atmosférico.

Processos	106t carbono/ano
Substituição da gasolina por álcool	-7,41
Substituição de óleo combustível por bagaço (indústria de alimentos e química)	-3,24
Uso de combustível fóssil na agroindústria	+1,2
Contribuição líquida	-9,45

Fonte: Adaptado de Borges e Arbex (1994).

Os autores explicam que essa contribuição ocorre devido ao fato de que a emissão de CO_2 resultante da queima de combustíveis de biomassa é compensada pela absorção de CO_2 pelas plantas durante seu processo de crescimento. E essa dinâmica contrasta com os combustíveis fósseis, nos quais não há o mesmo processo de absorção de CO_2 durante o ciclo de vida do combustível.

4.3.4 Fundamentos da Termodinâmica

A termodinâmica é a ciência da energia e entropia (WYLEN; SONNTAG; BORGNAKKE, 1994). Em outras palavras, o autor complementa que a mesma é a ciência que trata do calor e do trabalho, e daquelas propriedades relacionadas a estes.

Afonso (2012) conceitua, de modo consoante, que a termodinâmica é a ciência que diz respeito a energia, as diferentes formas sob as quais se manifesta, suas transformações e as interações entre energia e massa. O mesmo ainda afirma que a energia é a chave do avanço da

civilização e que a evolução das sociedades humanas depende da conversão desta para o uso humano.

Como campo de estudo, esta ciência utiliza leis e princípios fundamentais que são baseados em observações experimentais. Essas leis são fundamentais para compreender e descrever o comportamento dos sistemas termodinâmicos. As leis principais da termodinâmica incluem: zero, primeira, segunda e terceira leis da termodinâmica. As mesmas são fundamentais para entender como a energia é transferida e transformada em sistemas físicos.

4.3.5 Primeira Lei da Termodinâmica

A Primeira Lei da Termodinâmica, também conhecida como Lei da Conservação da Energia, estabelece o princípio fundamental de que a energia total de um sistema isolado permanece constante. Em outras palavras, a energia não pode ser criada nem destruída, apenas transformada de uma forma para outra (DANTAS, 2010a).

A expressão matemática da Primeira Lei da Termodinâmica é frequentemente escrita como:

$$\Delta U = Q - W \quad (4.1)$$

onde:

ΔU é a variação da energia interna do sistema;

Q representa o calor transferido para o sistema;

W é o trabalho realizado pelo sistema.

Essa equação indica que a variação da energia interna de um sistema é igual à subtração do calor fornecido ao sistema e do trabalho realizado pelo sistema sobre seu ambiente.

Um balanço de massa e energia é feito para avaliação de sistemas energéticos abertos que utilizam esta lei, pois em todo o sistema podem existir fluxos de entrada e saída tanto de massa como de calor e trabalho (DANTAS, 2010a). Na forma de uma equação, a Primeira Lei da Termodinâmica para um volume de controle pode ser expressa da seguinte maneira:

$$\Delta E = Q - W + \sum \left(\dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right)_{\text{entrada}} \right) - \sum \left(\dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right)_{\text{saída}} \right) \quad (4.2)$$

Onde:

- ΔE : variação da energia total do volume de controle;
- Q : calor adicionado ao sistema;
- W : trabalho realizado pelo sistema;

- $\dot{m}$: taxa de fluxo de massa;
- h : entalpia específica;
- $\frac{v^2}{2}$: energia cinética específica, onde v é a velocidade;
- gz : energia potencial específica, onde g é a aceleração devido à gravidade e z é a altura.

A partir desses fundamentos, segundo Dantas (2010b) dependendo do sistema de conversão de energia, esses termos podem ser calculados e utilizados em diversos tipos de aplicações.

4.3.6 Segunda Lei da Termodinâmica

2.3.3.4 Segunda Lei da Termodinâmica Quem deu clareza às transformações de calor em trabalho foram, inicialmente, Carnot e posteriormente, Clausius, Boltzmann, Maxwell, Kelvin, Planck e Gibbs, consolidando ainda no século XIX a Segunda Lei da Termodinâmica (JÚNIOR, 2020). O autor completa que essa lei introduziu o conceito de geração de entropia, que está diretamente associado ao aumento da desordem e à perda de qualidade da energia em um sistema durante suas transformações. Esses conceitos estão estreitamente ligados às irreversibilidades nos sistemas.

Para o mesmo autor, a exergia é definida como o trabalho máximo que pode ser obtido de um sistema desde seu estado inicial até atingir o estado final, este último, em equilíbrio termodinâmico com o ambiente.

A Segunda Lei da Termodinâmica para um volume de controle pode ser expressa da seguinte maneira:

$$\Delta S = \frac{Q}{T} + \sum (\dot{m}s)_{\text{entrada}} - \sum (\dot{m}s)_{\text{saída}} + S_{\text{gerada}} \quad (4.3)$$

Onde:

- ΔS : variação da entropia total do volume de controle;
- Q : calor trocado pelo sistema.
- T : temperatura absoluta na qual a troca de calor ocorre;
- $\dot{m}$: taxa de fluxo de massa.
- s : entropia específica;
- S_{gerada} : entropia gerada dentro do volume de controle devido a irreversibilidades.

Com base no sistema de conversão de energia, as considerações derivadas da aplicação tanto da Primeira Lei da Termodinâmica quanto da Segunda Lei da Termodinâmica podem variar, sendo determinadas de forma específica para cada caso em estudo (DANTAS, 2010b). O estudo feito por este autor revelou que o método da exergia é uma ferramenta termodinâmica que, em conjunto com os princípios da primeira lei, é capaz de avaliar de maneira quantitativa e qualitativa a eficiência de um processo. Na modelagem que relaciona exergia com emissões, a primeira e segunda leis são utilizadas no volume de controle indústria sucroalcooleira, que inclui tanto o processamento industrial quanto o campo, cujas entradas e saídas de exergia e massa são contabilizadas.

4.3.7 Exergia

A exergia representa uma análise da porção útil da energia de um sistema que pode ser utilizada para realizar trabalho. Gonçalves e Gaspar (2012) define a exergia em quatro principais aspectos, sendo: capacidade de transformar energia em energia organizada; disponibilidade da energia operar as mudanças e capacidade de conservar a qualidade de energia nessas mudanças e diferenciação da qualidade da energia.

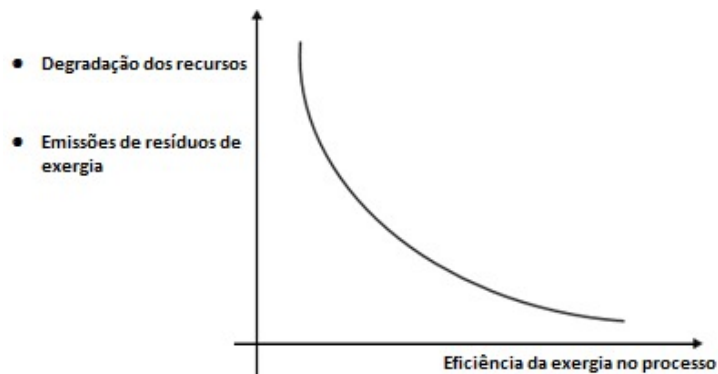
O método da análise exergética é particularmente apropriado para maximizar o objetivo de um uso mais eficiente de energia, já que ele permite a determinação de rejeitos e perdas em termos de sua localização, tipo e valores reais (MORAN; SHAPIRO; BOETTNER, 2000). Segundo Silva, Junior e Costa (2012) isto é possível uma vez que este conceito está intimamente ligado aos fundamentos da Segunda Lei da Termodinâmica.

Para sistemas de produção de bioenergia com alto consumo de insumos de alto valor energético, a exergia consumida é comparativamente próxima à energia dos próprios combustíveis fósseis utilizados no sistema. Por sua vez, a exergia produzida consiste, em tese, na soma dos produtos de alto valor energético que saem do sistema. Isso inclui a energia dos biocombustíveis produzidos, juntamente com a eletricidade exportada para o sistema elétrico, que é a exergia exportada pelo sistema.

Júnior (2020) aponta uma correlação que é abordada por Dincer e Rosen (2012), e exemplificada pela Figura 11. Nesta correlação, quanto maior for a eficiência exergética de um processo, menor será a degradação dos recursos e as emissões de resíduos de exergia. Isso significa que o processo está sendo executado de forma mais eficiente, com uma utilização mais completa da energia disponível, resultando em menos desperdício e impacto ambiental reduzido. Em outras palavras, uma alta eficiência exergética indica uma melhor utilização dos recursos e uma menor perda de energia durante o processo, o que contribui para a sustentabilidade e redução dos impactos ambientais.

Em outras palavras, o processo está sendo executado com uma utilização mais eficiente da energia disponível. O que contribui para a sustentabilidade e redução dos impactos ambien-

Figura 11 – Qualitativo da relação entre eficiência exergética do processo e os impactos ambientais associados.



Fonte: (JÚNIOR, 2020)

tais.

Para o setor sucroalcooleiro Júnior (2020) cita que *exergy breeding* é um indicador bastante interessante, isto porque, ao avaliar a eficiência exergética, dentre os vários indicadores de exergia de seu estudo de caso, este é o que melhor relaciona, dentro de um volume de controle, os fluxos de exergia versus fluxos de emissões na bioenergia. Para estes sistemas os fluxos de energia e de exergia são bem próximos (JÚNIOR, 2020).

4.3.8 Combustão

Combustível é a substância que pode sofrer combustão, enquanto comburente é a substância que fornece o oxigênio necessário para a combustão. No contexto da combustão, o combustível reage com o comburente, geralmente oxigênio do ar, liberando energia na forma de calor e luz. Esses dois elementos são essenciais para o processo de combustão ocorrer.

O processo de combustão representa o estágio inicial na conversão da energia química contida no combustível para energia elétrica e, teoricamente, é caracterizado como uma reação química exotérmica autossustentada, na qual os elementos combustíveis do combustível passam por oxidação (MORORÓ, 2016).

A autora cita também que para que ocorra a combustão de modo eficiente é necessário que três principais condições existam:

- Temperatura alta o suficiente para iniciar e manter a queima do combustível;
- Mistura adequada do ar com o combustível;
- Tempo suficiente para a ocorrência da reação de combustão.

A reação de combustão de um dado combustível com o ar atmosférico pode ser esquematizada da seguinte maneira: $\text{Combustível} + \text{Ar} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{Água} + \text{Energia}$

Nessa reação, o combustível reage com o oxigênio presente no ar para formar dióxido de carbono (CO_2), água (H_2O) e liberar energia, além de outros poluentes. A energia liberada durante a combustão é geralmente na forma de calor. É importante destacar que diferentes combustíveis podem apresentar composições químicas distintas, o que resulta em variações nos produtos da combustão. Além disso, dependendo das condições de combustão, podem ser formados outros compostos, como óxidos de nitrogênio (NO_x) e outros subprodutos.

No caso da queima da biomassa os produtos esperados da oxidação completa dos reagentes são o dióxido de carbono, dióxido de enxofre e água. Pode apresentar também nos produtos o excesso de ar e umidade do combustível. Um indicador de que a combustão ocorreu em regime inadequado é a obtenção de monóxido de carbono, hidrogênio diatômico e gás metano.

A combustão direta refere-se à oxidação completa de um combustível na presença de oxigênio, resultando na formação de dióxido de carbono e água como principais produtos. Este processo é caracterizado por uma queima completa e eficiente. Assim, é um processo no qual o combustível reage diretamente com o oxidante, geralmente o oxigênio do ar, sem a necessidade de uma etapa intermediária.

Por outro lado, a combustão indireta envolve a oxidação parcial de um combustível na ausência de oxigênio suficiente para uma queima completa. Isso geralmente resulta na formação de gases combustíveis, como monóxido de carbono e hidrocarbonetos, além de subprodutos como alcatrão e resíduos carbonosos. Envolve uma etapa adicional, na qual o combustível passa por um processo de gaseificação ou pirólise antes de reagir com o oxidante. Esse processo intermediário ocorre em condições controladas, produzindo gases combustíveis que, em seguida, reagem na etapa de combustão.

Bosco (2014) em sua dissertação cita que os processos físico-químicos presentes nas reações de combustão são complexos e de difícil modelagem, em termos mais simples, as reações de combustão envolvem a complexa oxidação do carbono e do hidrogênio presentes na biomassa. Essa oxidação resulta na formação de dióxido de carbono (CO_2), água (H_2O) e liberação de calor, junto com a possível geração de outros subprodutos secundários (BOSCOV, 2014)

4.3.9 Estequiometria da Combustão

A quantidade mínima de ar necessária para garantir a combustão completa de todo o carbono, hidrogênio e enxofre presentes no combustível é chamada de quantidade teórica de ar ou estequiométrica (MORORÓ, 2016).

A autora ainda afirma que, em outras palavras, um processo de combustão é considerado completo quando todo o carbono presente no combustível é oxidado para formar dióxido de carbono, todo o hidrogênio (H) é oxidado para formar água (H_2O), todo o enxofre (S) é oxidado para formar dióxido de enxofre (SO_2), e todos os outros elementos combustíveis são totalmente oxidados. E a quantidade de calor liberada em cada reação é chamada de entalpia de combustão.

A reação de combustão com excesso de ar ocorre quando há mais oxigênio disponível do que o necessário para a combustão completa de todos os componentes do combustível. Esse excesso de oxigênio garante que todos os elementos presentes no combustível, como carbono, hidrogênio e enxofre, sejam totalmente oxidados.

Já a reação de combustão incompleta é um processo em que não há oxigênio suficiente disponível para oxidar completamente todos os componentes do combustível. Isso resulta na formação de subprodutos não queimados, como monóxido de carbono (CO) em vez de dióxido de carbono a partir do carbono, além de outros subprodutos indesejados. Esse processo além de levar a emissões poluentes é menos eficiente em termos de aproveitamento energético em comparação com a combustão completa.

O balanço de massa na combustão é feito considerando a conservação da massa total dos reagentes e produtos envolvidos no processo. Em sistemas fechados, a Lei da Conservação da Massa estabelece que a massa total antes de uma reação química deve ser igual à massa total após a reação.

Para realizar o balanço de massa na combustão, é necessário identificar e quantificar os reagentes que entram no sistema (combustíveis e oxidantes) e os produtos resultantes da reação. A equação química balanceada da combustão é fundamental para isso, garantindo que o número de átomos de cada elemento seja o mesmo nos reagentes e produtos.

Por exemplo, a equação química típica da combustão completa de um hidrocarboneto simples, como o metano (CH_4), é representada como:



Nessa equação, é possível observar que um mol de metano reage com dois mols de oxigênio para produzir um mol de dióxido de carbono e dois mols de água. Ao fazer o balanço de massa, as quantidades de cada átomo nos reagentes devem ser iguais às quantidades nos produtos.

O balanço de massa é uma ferramenta fundamental para entender e controlar processos de combustão em diversos contextos, como na indústria e na geração de energia.

4.3.10 Bagaço da Cana-de-açúcar como Combustível

A queima direta continua sendo a técnica predominante na geração de energia térmica a partir de biomassa. Nesse contexto, para Cruz (2023) é essencial ter conhecimento de diversas propriedades do combustível, e uma delas é o poder calorífico de combustão.

O poder calorífico, também conhecido como valor calorífico, refere-se à quantidade de calor liberada durante a combustão completa de uma determinada quantidade de um combustível. É definido por Quirino et al. (2005) como a quantidade de energia na forma de calor liberada pela combustão de uma unidade de massa. Esta é uma medida crucial para avaliar a eficiência de um combustível na produção de energia térmica.

De acordo com Madanayake et al. (2017), o poder calorífico é uma das propriedades termoquímicas fundamentais de um combustível sólido, apresentando duas variantes: poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI). O PCI leva em conta que a água gerada durante a reação de combustão permanece na fase de vapor, enquanto o PCS considera que a água produzida na reação permanece na fase líquida.

Em termos simples, ARALDI (2022) cita que a avaliação das características energéticas de biomassas para a conversão em energia implica a determinação experimental do poder calorífico superior (PCS, em kJ/kg), massa específica (em kg/m^3), análise imediata (umidade, matéria volátil, cinzas e carbono fixo), análise elementar (C, H, N, S e O), análise somativa (porcentagem em massa de celulose, hemicelulose, lignina e outros componentes), composição de cinzas (porcentagem em massa de K, Na, Ca, Mg, P, Si, Fe) e outros parâmetros específicos, conforme necessário.

Uma usina sucroalcooleira é capaz de suprir suas próprias necessidades de energia, obtendo potência e calor através da queima de seu próprio combustível, o bagaço (CARVALHO et al., 2019). O autor expõe conforme a Tabela 7 o PCS de alguns combustíveis, bem como, na Tabela 8 a variação do PCI do bagaço da cana com os teores de umidade e sacarose.

Tabela 7 – Poder calorífico superior de alguns produtos.

Produto	PCS - kcal/kg
Lenha (20% de umidade)	2500-3000
Serragem e Cavacos	2500
Nó de pinho	4000
Carvão de pedra	7500
Casca de semente de algodão	2800
Bagaço de cana de açúcar (40% de umidade)	2300
Álcool etílico	7200
Butano	11800
Gasolina	11000

Fonte: Carvalho et al. (2019).

Em um estudo intitulado "Cálculo da relação ar/combustível e a eficiência em caldeira

Tabela 8 – PCI do bagaço com diferentes umidades e sacarose.

Umidade (%)	49	49	49	50	50	50	51	51	51
Pol(řS)	1	2	3	1	2	3	1	2	3
PCI - kcal/kg	1861	1850	1837	1813	1801	1789	1764	1752	1740

Fonte: Carvalho et al. (2019).

alimentada com bagaço de cana-de-açúcar"realizado por SILVA, FINZER e BEGNINI (2018) os autores buscaram relatar a quantidade estequiométrica de ar necessária para a queima de bagaço de cana de açúcar em uma caldeira. A caldeira estudada tinha capacidade de vapor de 15,7 ton/h com uma pressão de 17,6 bar e queima bagaço de cana-de-açúcar para cogeração e venda do excedente energético. A Tabela 9 mostra a composição química do bagaço de cana-de-açúcar queimada.

Tabela 9 – Composição química do bagaço de cana-de-açúcar

Elemento	Composição (%)
Carbono	48,5
Hidrogênio	7,0
Oxigênio	44,0
Nitrogênio	0,5

Fonte: Adaptado de SILVA, FINZER e BEGNINI (2018).

Como resultados principais os autores obtiveram que:

- A massa de ar estequiométrica, que foi de 606,366 Kg de ar/ Kg de bagaço de cana-de-açúcar;
- A relação teórica ar/bagaço de cana-de-açúcar, que foi de 6,06Kg de ar/Kg de bagaço.

E sabendo os dados reais de operação da caldeira, que era de 7,40Kg de ar/Kg de bagaço de cana, concluiu-se que a mesma operava com excesso de ar em torno de 22%. Com isso, a mesma obtinha uma eficiência de 64% , valor esse considerado pelos autores relativamente baixo, fazendo com que ocorresse perda de calor/energia.

Em um estudo semelhante, Arcos e Faria () avaliou a eficiência térmica de uma caldeira aquatubular que queima o bagaço da cana-de-açúcar como combustível. Este estudo foi realizado em uma usina sucroalcooleira e utilizou-se o balanço de massa e energia a fim de melhorar o rendimento térmico do gerador de vapor.

A caldeira analisada possuía capacidade de produção de 250.000 kg/h de vapor, com pressão de trabalho de 67 Kgf/cm² e temperatura 490žC. Toda a análise foi feita tendo como base o método direto e o indireto. Segundo Arcos e Faria () o método direto é caracterizado por quociente entre a energia útil e a energia disponível, já o método indireto diz respeito a análise das perdas do gerador de vapor para obter o valor da eficiência. Como resultado o autor obteve que inserindo as perdas de calor na caldeira com o método direto a eficiência do gerador de

vapor foi de 68,2%. Por outro lado, a utilização do método indireto trouxe resultado parecido, com a eficiência da caldeira em 68,32%.

Na avaliação da utilização dos biocombustíveis um dos pontos mais importantes é a compilação de todos os dados necessários para o cálculo do balanço de energia. Um estudo realizado por SOARES et al. (2009) que teve como foco a mitigação das emissões de gases efeito estufa na produção de etanol obteve resultados importantes. Na Figura 10 é detalhado que o balanço energético aponta que para cada 1,0 MJ de energia fóssil consumida, por exemplo em maquinários, se produz 9,35MJ de energia total, ou seja, 8,35MJ de energia renovável (SOARES et al., 2009).

Tabela 10 – Consumo de energia fóssil, produção de energia renovável e balanço energético do bioetanol.

	MJ/ha/ano
Total das operações agrícolas	12329,7
Total de entradas na usina	2611,1
Total de todas as entradas de energia fóssil	14940,8
Produção total de etanol	139639,5
Balanço energético final	9,35

Fonte: Adaptado de SOARES et al. (2009).

A energia total derivada de fontes fósseis usada nas atividades agrícolas, incluindo o transporte de cana até a usina e a provisão de insumos, é estimada em 12.329,7 MJ por hectare ao ano. Considerando que cada litro de etanol produzido na queima gera cerca de 21,45MJ de energia, um hectare de cana-de-açúcar capaz de gerar 6.510 litros de etanol pode produzir aproximadamente 139.639MJ de energia, o que representa aproximadamente 11 vezes a energia fóssil utilizada nas operações agrícolas (SOARES et al., 2009).

No mesmo estudo, os autores destacam ainda que a eliminação da queima do canavial antes da colheita, evidencia uma clara diminuição da poluição atmosférica, mesmo que haja um consumo elevado das máquinas cortadoras. Isso porque, conforme os autores, a colheita da cana crua elimina a emissão de CH_4 e N_2O que juntos totalizam 1719Kg de CO_2 por hectare.

4.4 Turbinas a Vapor - Geradores de Eletricidade

As turbinas a vapor são dispositivos mecânicos que convertem a energia térmica e cinética do vapor em energia mecânica, que por sua vez pode ser utilizada para gerar eletricidade, acionar máquinas ou realizar outros tipos de trabalho. Elas desempenham um papel fundamental na produção de energia elétrica em usinas termelétricas (SILVA, 2015).

O funcionamento básico de uma turbina a vapor envolve a passagem de vapor de alta pressão e alta temperatura através de palhetas ou pás fixas e móveis, chamadas de estágios, que estão localizadas no interior da turbina. À medida que o vapor passa pelas palhetas móveis, ele

exerce uma força sobre elas, fazendo com que a turbina gire. Esse movimento rotacional é então utilizado para acionar um gerador elétrico, por exemplo, para a produção de energia elétrica.

As turbinas a vapor são amplamente utilizadas em usinas de energia, principalmente em usinas termelétricas a carvão mineral, gás natural ou biomassa. Elas também são empregadas em usinas nucleares, onde o calor gerado pela fissão nuclear é utilizado para produzir vapor e acionar as turbinas. Além disso, as turbinas a vapor têm aplicações industriais em processos que requerem energia mecânica, como em refinarias, indústrias petroquímicas e plantas de cogeração (SOUZA; SOARES, 2019). Geradores que convertem a energia mecânica fornecida por uma turbina em energia elétrica são chamados de geradores síncronos, e estes são largamente utilizados na indústria energética quando existe a presença do ciclo de Rankine.

4.4.1 Turbinas

Um motor térmico rotativo, segundo YAMAZAKI (1973) a turbina é caracterizada pela transformação da energia entálpica do vapor de alta pressão em energia cinética durante sua expansão através dos bocais. Essa energia cinética é, por sua vez, convertida em energia mecânica de rotação devido à força aplicada pelo vapor nas pás rotativas. O eixo da turbina está conectado a um gerador, responsável por converter a energia mecânica em eletricidade. O rendimento entrópico da turbina, ao gerar eletricidade, possui um impacto no rendimento global do sistema sucroalcooleiro, isto é, da sua eficiência exergética/energética (JÚNIOR, 2020)

Segundo Paulino (2014) as turbinas a vapor usadas no processo de cogeração podem ser de contrapressão pura, ou de condensação e extração.

- Contrapressão pura - toda a vazão de vapor que entra na turbina sofre expansão, saindo da turbina com uma pressão entre 0,2 e 1,0 MPa. Esse tipo de configuração é empregado em processos nos quais as demandas por calor e energia eletromecânica são aproximadamente equilibradas
- Condensação e extração - uma parte do vapor que entra na turbina é retirada em uma ou mais etapas antes de atingir o ponto de descarga, onde ocorre a expansão do vapor até a pressão do condensador, que varia entre 0,005 e 0,01 MPa. Esse arranjo é utilizado em processos nos quais a ênfase está na produção de energia eletromecânica, especialmente em plantas onde é crucial evitar interrupções no fornecimento de energia.

Paula (2020) aponta em seu estudo dois aspectos favoráveis à utilização nas turbinas de condensação. O primeiro é o aumento da eficiência do ciclo, pois permite que o vapor se expanda na turbina até o mínimo possível para admissão no condensador, aumentando assim a geração de energia elétrica. Como também, a possibilidade de operação nos períodos entresafra.

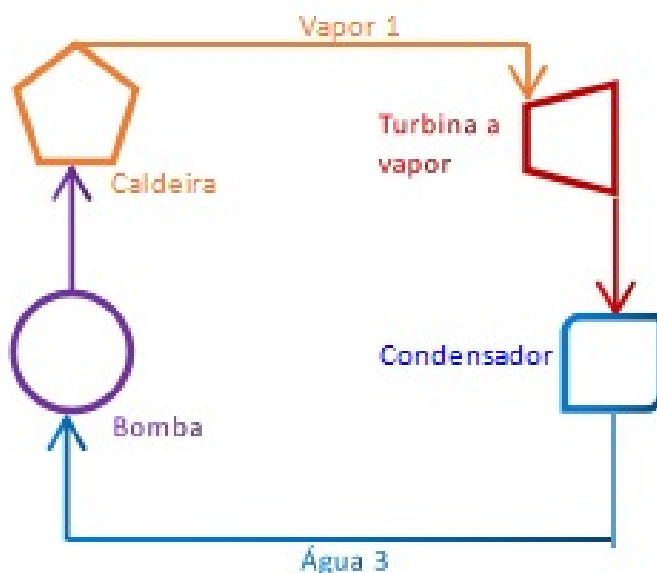
Nas usinas sucroalcooleiras o processo de cogeração mais aplicado são as turbinas a vapor utilizando ciclo Rankine (OLIVEIRA; NEVES; WAITMAN, 2017b).

4.4.2 Ciclo Rankine

O Ciclo Rankine é um ciclo termodinâmico que descreve o funcionamento básico de muitas usinas sucroalcooleiras. Ele opera com um fluido de trabalho, frequentemente água, e consiste em quatro principais processos termodinâmicos: compressão, aquecimento, expansão e resfriamento. Para isso é constituído de caldeira, turbina a vapor, condensador e bomba (CARVALHO et al., 2019).

O ciclo de cogeração é descrito pelo autor, e exemplificado pela Figura 12 afirmando que utilizando água como fluido de trabalho, inicia-se com a pressurização da água por uma bomba, encaminhando-a para a caldeira. Na caldeira, ocorre a queima de um combustível, liberando energia térmica que aquece o fluido de trabalho. Transformado em vapor de alta pressão, o fluido é expandido na turbina, convertendo a energia de pressão em energia cinética, gerando trabalho no rotor. O vapor, agora de baixa pressão e temperatura, é conduzido ao condensador, onde libera calor ao ambiente e se condensa em água. O calor rejeitado pode ser aproveitado para cogeração. A água condensada, acrescida da reposição necessária, é bombeada de volta à caldeira, fechando o ciclo.

Figura 12 – Esquema do Ciclo Rankine



Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2024).

Esse ciclo é utilizado para aproveitar o calor gerado pela queima de combustíveis, como carvão, gás natural ou biomassa, convertendo-o em energia mecânica e, posteriormente, em energia elétrica (SHAPIRO; MORAN, 2009).

A eficiência do ciclo de Rankine, definida como a razão entre a energia útil obtida na turbina e a energia térmica fornecida pela caldeira, depende das características do fluido de trabalho, do projeto e da operação dos equipamentos. Isso se dá pois, a eficiência do ciclo pode variar conforme a temperatura de condensação do vapor, bem como pelas perdas de calor no mesmo, nas tubulações e nos componentes mecânicos (ÇENGEL; BOLES, 2013).

Conforme cita Casado e Barbosa (2024) em sua pesquisa intitulada *Evaluation of energy efficiency in sugar cane bass burning processes in sugar and alcoholic plants*, o ciclo Rankine pode ser representado de maneiras simplificadas ou abordado de maneiras mais detalhadas e complexas. O autor afirma que há variações que incluem reaquecimento e regeneração, explorando o calor presente no fluido após a turbina para gerar energia adicional por meio de uma turbina de baixa pressão ou utilizando-o para pré-aquecer o fluido após a bomba, reduzindo a energia necessária para aquecê-lo na caldeira.

4.4.3 Ciclo Rankine Real

No ciclo real existem a presença de irreversibilidades e as perdas de eficiência associadas aos processos em vários componentes (ÇENGEL; BOLES, 2013). O autor também cita que o atrito do fluido nos equipamentos do processo resulta em uma queda de pressão significativa. E outra irreversibilidade considerada é a perda de calor do vapor para o meio externo.

Os cálculos para o ciclo de Rankine real são mais complexos devido a incorporação das perdas e irreversibilidades citadas acima. Porém eles fornecem, segundo o desempenho dos sistemas de geração de energia, uma representação mais precisa dessa operação. Isso porque, neste caso, é levado em consideração as limitações físicas e térmicas dos componentes do sistema.

Seguindo também os conceitos abordados pela Primeira Lei da Termodinâmica e com alguns incrementos a mais, a eficiência do ciclo real é obtida quando de maneira inicial é calculado a eficiência isentrópica da bomba e da turbina separadamente. A eficiência da bomba é expressa pela razão entre o trabalho isentrópico do estágio inicial e o trabalho real dessa mesma etapa.

$$\eta_b = \frac{w_s}{w_r} = \frac{h_2s - h_1}{h_2r - h_1} \quad (4.5)$$

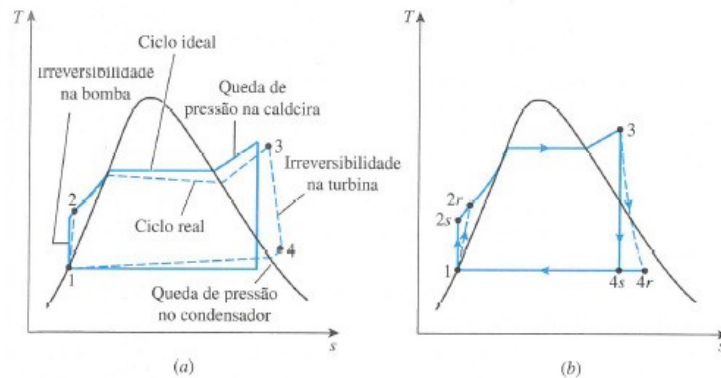
Já a eficiência da turbina é obtida pela razão entre o trabalho real sobre o trabalho isentrópico.

$$\eta_t = \frac{w_r}{w_s} = \frac{h_3 - h_4s}{h_3 - h_4r} \quad (4.6)$$

Sendo, os estados de saída reais da bomba e da turbina expressos por 2r e 4r. E 2s e 4s representando os estados isentrópicos destas respectivamente.

A Figura 13 apresenta um diagrama de Temperatura x Entropia onde é atestado tudo o que foi dito sobre o ciclo real de Rankine.

Figura 13 – a) Desvios do Ciclo a vapor Real e Ideal de Rankine; b) O efeito das irreversibilidades na bomba e na turbina.



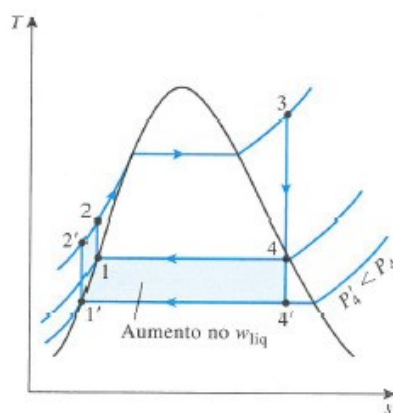
Fonte: (ÇENGEL; BOLES, 2013)

4.4.4 O aumento da eficiência no ciclo Rankine

As principais maneiras de aumentar a eficiência no ciclo rankine são: reduzindo a pressão no condensador; superaquecimento do vapor; aumento de pressão nos geradores de vapor.

A queda da pressão operante no condensador gera a diminuição da temperatura do vapor, e assim ocorre a redução da temperatura na qual o calor é rejeitado. O diagrama Temperatura x Entropia exposto da Figura 14 retrata o efeito da diminuição da pressão no condensador sobre a eficiência do ciclo.

Figura 14 – Efeito da queda na pressão do condensador.

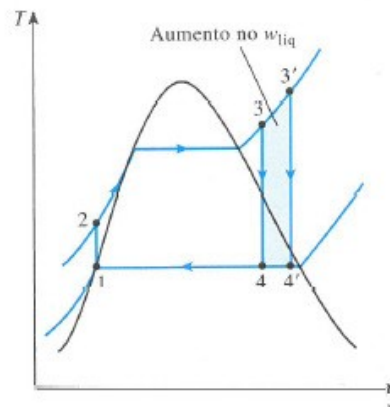


Fonte: (ÇENGEL; BOLES, 2013)

Nesse caso, a redução na temperatura de condensação aumenta a diferença de temperatura entre a fonte quente (caldeira) e a fonte fria (condensador). E isso por aumentar a eficiência do sistema.

Outrossim, o superaquecimento do vapor a altas temperaturas também agrega bons resultados a eficiência do processo. Isso porque o trabalho líquido, bem como, o consumo de calor aumenta. Outro ponto importante desse fator é a diminuição da umidade do vapor na saída da turbina, isso porque o título em 4' é maior que em 4. Tudo isso é exemplificado pelo diagrama Temperatura x Entropia da Figura 15.

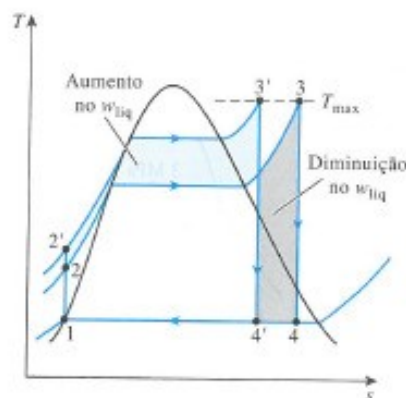
Figura 15 – Efeito do superaquecimento do vapor.



Fonte: (ÇENGEL; BOLES, 2013)

Aumentar a pressão na caldeira aumenta a temperatura do vapor, o que, por sua vez, aumenta a eficiência do ciclo. Isso acontece devido ao aumento da temperatura de ebulição que favorece a elevação média com a qual o vapor é produzido. No entanto, tanto aumentos de temperatura quanto de pressão implicam em limites da engenharia para os equipamentos suportarem estas condições adversas. O diagrama da Figura 16 mostra o efeito do aumento da pressão da caldeira sobre o ciclo de Rankine.

Figura 16 – Efeito do aumento da pressão na caldeira.



Fonte: (ÇENGEL; BOLES, 2013)

CAPÍTULO 5

Discussão

Este estudo buscou contextualizar a perspectiva histórica e evolutiva dos aspectos tecnológicos e ambientais relacionados à geração de eletricidade no Brasil por meio do resíduo da moagem da cana-de-açúcar, o bagaço. E com isso realizar uma abordagem crítica do tema proposto, ao comparar diversos estudos realizados por diferentes autores pelo mundo.

Os avanços tecnológicos e os impactos ambientais relacionados à bioenergia do bagaço da cana-de-açúcar na geração de eletricidade no Brasil constituem um tema complexo e de grande relevância. Ao longo desta revisão bibliográfica, foram explorados diversos aspectos desse cenário dinâmico, destacando não apenas as conquistas e inovações, mas também as considerações ambientais para a sustentabilidade deste setor.

Anteriormente, os sistemas de cogeração limitavam-se a gerar energia elétrica para atender às demandas internas das indústrias. No entanto, com o avanço tecnológico, esses sistemas evoluíram para produzir não apenas energia suficiente para uso interno, mas também excedentes que podem ser fornecidos à rede elétrica, trazendo benefícios adicionais para as indústrias e ao meio ambiente.

A trajetória histórica revelou uma notável evolução, desde as primeiras iniciativas até as modernas usinas de cogeração, que se tornaram autossuficientes e contribuem significativamente para a matriz energética nacional. No entanto, paralelamente a esses progressos, também foi identificado desafios ambientais que demandam atenção contínua. Isso porque, por exemplo, como mostram os estudos de Ponce (2019) com o aumento da mecanização do processo agrícola a maior parcela das emissões ao meio ambiente ocorre nesta fase da produção sucroenergética. No entanto, aumentos de produção e mesmo de produtividade provocados pela maior mecanização podem significar uma melhoria global nas emissões de gases, visto que ao final, a produção de energia, seja em biocombustíveis, seja em energia elétrica da biomassa acabam compensando esta maior parcela ao substituir combustíveis fósseis pela biomassa.

Assim, emissões de gases de efeito estufa, a gestão sustentável dos resíduos e a otimização dos processos visando a redução do impacto ambiental são áreas críticas que requerem

abordagens proativas e estratégias integradas.

Além disso, a análise minuciosa de todos os estágios do ciclo de vida, desde o cultivo da cana-de-açúcar até a geração de eletricidade, proporciona uma visão abrangente dos impactos ambientais associados às operações. Conforme enfatizado por Leal e Macedo (2004) investir em tecnologias avançadas, práticas agrícolas sustentáveis e inovações na geração de energia é essencial para maximizar os benefícios da ACV no contexto das sucroalcooleiras. Isso porque, para o autor as melhorias no cultivo e na colheita da cana-de-açúcar, juntamente com uma utilização mais eficiente de sua biomassa para a geração de eletricidade, aprimora o balanço energético líquido e diminui as emissões de gases de efeito estufa.

Dessa forma, ao integrar a ACV como uma prática regular em suas operações, as indústrias de geração de eletricidade por meio do bagaço atendem aos requisitos ambientais e sociais, como também posicionam-se como líderes na adoção de abordagens sustentáveis, promovendo um setor mais responsável e alinhado com os desafios globais de sustentabilidade.

Além disso, os estudos indicaram uma preocupação crescente com os aspectos ambientais associados à produção de energia a partir do bagaço da cana-de-açúcar. Houve uma tendência de adoção de práticas sustentáveis, através de uma legislação impositiva, como é o caso da mitigação na queima da cana antes da colheita. Visando assim, reduzir as emissões de gases de efeito estufa, minimizar o impacto ambiental e promover a utilização mais eficiente dos recursos naturais. Tudo isso é indicado no trabalho de Prado (2007) como também apontado por Júnior (2020) quando o mesmo afirma que a produtividade da cana, dentre vários indicadores de seu estudo de caso, é o insumo mais sensível para a mitigação das emissões, e neste contexto, além do manejo agrícola, novas variedades têm sido desenvolvidas.

Em alguns estudos de campo, produzidos por outros autores, em usinas de açúcar e álcool que possuíam sistemas de cogeração de energia elétrica foi visto a importância dos geradores de vapor para todo o sistema. Os geradores que possuem uma configuração de tubos imersos em água garantem pressões e temperaturas de trabalhos mais adequadas ao bom funcionamento das turbinas. O foco principal do trabalho não gira em torno do rendimento desses geradores de vapor, porém esse é um dado de grande valia. E nesse caso, mesmo em análises diferentes, a eficiência térmica das caldeiras é próxima e está em torno de 65%.

A aplicação do ciclo Rankine nas usinas sucroalcooleiras, usualmente não combinado a outros tipos de ciclo, demonstra ser uma estratégia eficiente e vantajosa para a geração de eletricidade. Isso porque, a natureza versátil do ciclo, aliada à capacidade de utilizar o bagaço da cana-de-açúcar como combustível, proporciona benefícios econômicos e ambientais notáveis. Nas sucroalcooleiras, a eficiência é incrementada pela capacidade de aproveitar o calor do resíduo outrora descartado bagaço, resultando basicamente em duas parcelas, uma para gerar eletricidade e outra como vapor de processo. Assim, pode-se afirmar que o processo de cogeração, no qual tanto calor quanto eletricidade são gerados, aumenta a eficiência global das usinas.

Diante desse panorama, o Brasil, pela abundância de luz solar e água, pelos avanços já alcançados nas tecnologias da agro-indústria já é referência em bioenergia, mas possui ainda um potencial significativo para continuar avançando no aproveitamento tanto na produção de etanol quanto na energia elétrica oriunda do bagaço da cana-de-açúcar. O desenvolvimento de políticas públicas, investimentos em pesquisa e inovação, e a colaboração entre os setores público e privado são essenciais para garantir uma transição sustentável em direção a uma matriz energética mais limpa e eficiente.

CAPÍTULO 6

Conclusão

Por meio de tudo que foi apresentado com base nos objetivos iniciais é possível afirmar que a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis, como o bagaço da cana-de-açúcar, contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa, fortalecendo o compromisso com a sustentabilidade ambiental. Assim, essa bioenergia, gerada paralelamente ao biocombustível etanol, não apenas representa uma fonte valiosa de eletricidade, mas também desempenha um papel fundamental na construção de um futuro energético mais sustentável e resiliente para o Brasil.

A energia proveniente da biomassa não substitui outras fontes como um todo, mas pode auxiliar em momentos de menor produção, por exemplo, durante a estiagem, no caso das hidrelétricas, ou em momentos de aumento consumo da energia. Assim as usinas geradoras de bioeletricidade auxiliam e dão maior estabilidade ao sistema elétrico.

A produção de bioeletricidade a partir da cana-de-açúcar no Brasil tem ganhado destaque e reconhecimento desde o seu surgimento, devido às numerosas vantagens associadas a essa prática. O aproveitamento eficiente da matéria-prima, o aproveitamento adequado e eficaz do bagaço e o consequente aumento do rendimento global da indústria são aspectos fundamentais nesse processo. Esses elementos formam uma sinergia que não só impulsiona a produção de energia limpa e renovável, mas também contribui para a sustentabilidade ambiental e econômica do setor sucroalcooleiro.

A implantação da avaliação do ciclo de vida no setor sucroenergético como prática regular nas operações desde o plantio até a geração de eletricidade, se mostrou importante e decisiva em vários aspectos. Isso porque, a análise mostra que, embora tenham ocorrido melhorias significativas na eficiência e na sustentabilidade das operações, como é o caso da redução e até proibição, da queima da palha pré colheita, ainda existem questões cruciais a serem abordadas, como as emissões de gases de efeito estufa no processo agrícola, bem como a adequação de boas práticas de reuso de resíduos.

Houve uma melhora na eficiência global do sistema produtivo nas indústrias de açúcar

e álcool, isso porque os avanços tecnológicos possibilitaram o aumento da produtividade da cana-de-açúcar, como também, no controle de estoque e processamento do bagaço, bem como turbinas e geradores mais eficientes. Motivos esses que fizeram a bioenergia do bagaço da cana se tornar atrativa às indústrias visto a possibilidade de geração de energia elétrica não apenas para uso interno, mas também para comercialização na rede elétrica. Essa viabilidade se deve à possibilidade de suprir as próprias demandas energéticas da indústria, ao mesmo tempo em que permite a venda do excedente de eletricidade gerada.

Para trabalhos futuros é sugerido uma análise de viabilidade econômica da bioenergia do bagaço da cana-de-açúcar, considerando investimentos em novas tecnologias, custos operacionais e possíveis benefícios financeiros para as empresas do setor sucroalcooleiro. Como também, uma possível avaliação da adoção de políticas públicas e incentivos governamentais na promoção da bioenergia do bagaço da cana-de-açúcar, analisando como essas medidas influenciam as decisões estratégicas das empresas e o desenvolvimento do setor.

Referências

- AFONSO, C. *Termodinâmica para engenharia*. Porto: FEUP edições, 2012. v. 14.
- ALMEIDA, L. d. C. Potencial do bagaço de cana na matriz energética brasileira nos Últimos 20 anos e os impactos recentes do coronavírus. XXX Congresso de Iniciação Científica UNICAMP, 2022.
- ANEEL, A. N. d. E. E. *Matriz por Origem de Combustível*. 2024. Disponível em: <<https://app.powerbi.com/>>.
- ANTUNES, J. F.; LAMPARELLI, R. A.; RODRIGUES, L. H. Avaliação da dinâmica do cultivo da cana-de-açúcar no estado de são paulo por meio de perfis temporais de dados modis. *Engenharia agrícola*, SciELO Brasil, v. 35, p. 1127–1136, 2015.
- ARALDI, A. Desenvolvimento de protótipo para torrefação de biomassa visando à geração de energia. 2022.
- ARCOS, C. A.; FARIA, G. T. Análise de rendimento energético da caldeira alimentada com bagaço de cana-de-açúcar.
- ARNAO, J. H. S. *Caldeiras Aguatubulares de Bagaço-Estudo do Sistema de Recuperação de Energia*. Tese (Doutorado) — Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *CALDEIRAS, VASOS DE PRESSÃO, TUBULAÇÕES E TANQUES METÁLICOS DE ARMAZENAMENTO*. 2. ed. Rio de Janeiro, 2018.
- BAGGIO, R. W. de O. Modelagem de uma caldeira flamotubular com fornalha aquatubular. 2018.
- BAGGIO, R. W. de O. Modelagem de uma caldeira flamotubular com fornalha aquatubular. Blumenau, SC, 2019.
- BARBELI, M. C. A cogeração de energia e sua importância do ponto de vista técnico, econômico e ambiental. *Empreendedorismo, Gestão e Negócios*, v. 4, n. 4, p. 238–246, 2015.
- BARROS, F. F.; MILAN, M. Qualidade operacional do plantio de cana-de-açúcar. *Bragantia*, SciELO Brasil, v. 69, p. 221–229, 2010.
- BERG, E. A. T.; NOGUEIRA, L. A. H. Cogeração na indústria cerâmica. *Cerâmica Industrial*, v. 1, n. 3, 1996.

BIOENERGIA, U. União da Indústria de Cana-de-Açúcar e. *ACOMPANHAMENTO DA SAFRA ATUAL NA REGIÃO CENTRO-SUL*. 2023.

BIORRENOVÁVEIS, L. Laboratório Nacional de. *Biomassa de cana-de-açúcar*. 2023.

BORGES, J. M. M.; ARBEX, J. G. Cana-de-açúcar e energia. *Revista Brasileira de Energia*, v. 3, n. 2, p. 107–115, 1994.

BOSCOV, J. A. Modelagem e desenvolvimento de um sistema de controle de combustão de biomassa de baixo custo. 2014.

BOTELHO, M. H. C.; BIFANO, H. M. *Operação de caldeiras: gerenciamento, controle e manutenção*. [S.l.]: Editora Blucher, 2015.

BRAIBANTE, M. E. F. et al. A cana-de-açúcar no brasil sob um olhar químico e histórico: uma abordagem interdisciplinar. *Química nova na escola*, v. 35, n. 1, p. 3–10, 2013.

BRAIBANTE, M. E. F. et al. A cana-de-açúcar no brasil sob um olhar químico e histórico: uma abordagem interdisciplinar. *Química nova na escola*, v. 35, n. 1, p. 3–10, 2013.

BRAND, M. A.; GIESEL, G. Influência da secagem da biomassa na eficiência de caldeira de cogeração energética. *Energia na Agricultura*, v. 32, n. 2, p. 132–140, 2017.

CAMARA, G. S. M. *Ecofisiologia da cultura da cana-de-açúcar. Producao de Cana-De-Acucar*. Piracicaba: Fealq, 1993. 31–64 p.

CARVALHO, A. H. S. et al. Influência da umidade do bagaço da cana-de-açúcar no sistema de cogeração de energia. *SITEFA*, v. 2, n. 1, p. 445–456, 2019.

CARVALHO, L. et al. Cana-de-açúcar e álcool combustível: histórico, sustentabilidade e segurança energética. *Enciclopédia Biosfera*, v. 9, n. 16, 2013.

CASADO, L. D.; BARBOSA, A. T. R. Avaliação da eficiência energética nos processos de queima do bagaço da cana-de-açúcar em usinas sucroalcooleiras. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, v. 10, n. 2, p. 16962–16962, 2024.

CASSULA, D. A. et al. Estudo de caso sobre a eficiência energética de fontes renováveis no brasil: avaliação da utilização da biomassa da cana-de-açúcar na cogeração de energia elétrica no setor sucroalcooleiro. In: *VI Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Anais... Porto Alegre: IBEAS-Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais*. Porto Alegre, RS: [s.n.], 2015.

CHEHEBE, J. R. B. *Análise do ciclo de vida de produtos: ferramenta gerencial da ISO 14000*. São Carlos, SP: Qualitymark Editora Ltda, 1997.

COLETI, J.; STUPIELLO, J. Plantio da cana-de-açúcar. in. segato, sv; pinto, as; jendiroba, e.; nóbrega, jcm. *Atualizações em produção de cana-de-açúcar*. Piracicaba: CP, v. 2, 2006.

CONAB, C. Acompanhamento da safra brasileira 2022/2023-4o levantamento., 2023b. disponível em:< file. C:/Users/lteixeira/Downloads/E-book_BoletimZdeZSafrasZcana_4ZlevZ2023.pdf>. Acesso em, v. 1, 2023.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. S.; GOMEZ, E. O. *Biomassa para Energia*. São Paulo: Unicamp, 2008.

CRUZ, A. F. d. *Modelagem de fornalha e caldeira para combustão de resíduos sólidos urbanos*. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2023.

DANTAS, D. N. *Uso da biomassa de cana-de-açúcar para geração de energia elétrica: análise energética, exergética e ambiental de sistemas de cogeração em sucroalcooleiras do interior paulista*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2010.

DANTAS, D. N. *Uso da biomassa de cana-de-açúcar para geração de energia elétrica: análise energética, exergética e ambiental de sistemas de cogeração em sucroalcooleiras do interior paulista*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2010.

DINCER, I.; ROSEN, M. A. *Exergy: energy, environment and sustainable development*. Waltham, MA: Newnes, 2012.

DOMÊNICO, M. D.; SILVA, T. L. da; RIBEIRO, L. A. Avaliação de ciclo de vida dos sistemas construtivos de uma unidade habitacional de interesse social. *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, v. 10, n. 1, p. e20442–e20442, 2021.

ENCICLO. *5 Softwares para realizar Análise de Ciclo de Vida (ACV) dos seus produtos*. 2015. Disponível em: <<https://www.enciclo.com.br/>>.

ENERGIA, A. da Indústria de Cogeração de. *Conceito e Tecnologias*. 2023.

FLANDOLI, H. R. Uma avaliação das emissões de gases do efeito estufa e de ruídos na produção e geração de bioeletricidade a partir da biomassa da cana-de-açúcar. 2014.

GARCIA, J. C. C.; SPERLING, E. V. Emissão de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol: estimativa nas fases de agricultura e industrialização em minas gerais. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, SciELO Brasil, v. 15, p. 217–222, 2010.

GIMENEZ, A. R. et al. O aumento da produtividade e a busca pela excelência na produção do etanol brasileiro: uma história de sucesso. *Research, Society and Development*, v. 7, n. 2, p. e1472195–e1472195, 2018.

GOLDEMBERG, J. *Bioenergia no estado de São Paulo: situação atual, perspectivas, barreiras e propostas*. São Paulo, SP: Imprensa Oficial do Estado de São Paulo, 2008.

GONÇALVES, L. C. C.; GASPAR, P. D. Energia, entropia, exergia. *ICEUBI*, International Conference on Engineering-University of Beira Interior (ICEUBI ?), 2012.

GRISOLI, R. P. S. *Comparação das emissões de gases de efeito estufa no ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar e os critérios da diretiva europeia para energias renováveis*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2011.

HAES, H. U. D.; ROOIJEN, M. V. Life cycle approaches—the road from analysis to practice. *UNEP/SETAC Life Cycle Initiative*, v. 67, 2005.

HUGOT, E. *Manual da engenharia açucareira*. [S.l.]: Mestre Jou, 1969.

JÄRVINEN, T.; ALAKANGAS, E.; ENERGY, V. Cofiring of biomass evaluation of fuel procurement and handling in selected existing plants and exchange of information. 2001.

JUNIOR, A. G. *Crise do Petróleo*. 2013. Disponível em: <<https://www.infoescola.com>>.

- JÚNIOR, J. D. d. A. Desempenho exergético e emissões de gases de efeito estufa no uso do biocarvão no setor sucroenergético. 2020.
- KIMURA, L. M. et al. Uma contribuição à pirólise de biomassa: avaliação de alguns resíduos da agroindústria como fonte de energia alternativa. Universidade Federal de Uberlândia, 2009.
- LEAL, M.; MACEDO, I. d. C. Evolução tecnológica dos sistemas de geração de energia nas usinas de açúcar e álcool. *Biomassa & Energia*, v. 1, n. 3, p. 245–253, 2004.
- LOBO, C. d. S. A importância da cogeração utilizando bagaço de cana-de-açúcar como forma de diversificação da matriz elétrica. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.
- LORENSETTI, R. *Cogeração: entenda como funciona a produção de energia elétrica em uma usina sucroalcooleira*. 2022. Disponível em: <<https://blog.cocontrol.com.br/>>.
- MACEDO, J. C. F. et al. Análise térmica e ambiental da queima do lodo primário da fabricação de papel e celulose em caldeira de biomassa à grelha. Universidade Federal de Itajubá, 2006.
- MADANAYAKE, B. N. et al. Biomass as an energy source in coal co-firing and its feasibility enhancement via pre-treatment techniques. *Fuel Processing Technology*, Elsevier, v. 159, p. 287–305, 2017.
- MALICO, I. Energia da biomassa. *Geoboletim*, v. 7, p. 4–5, 2008.
- MORAES, B. de; JUNIOR, E. A. Z. Viabilidade econômica de cogeração em caldeiras a vapor de grande porte. *Revista Técnico-Científica*, n. 15, 2018.
- MORAIS, V. L. M.; ALSINA, O. L. S.; GOMES, W. C. 4. utilização do bagaço de cana-de-açúcar como biomassa adsorvente na adsorção de poluentes orgânicos. *Revista eletrônica de materiais e processos*, v. 2, n. 1, 2007.
- MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N.; BOETTNER, D. D. *Princípios de termodinâmica para engenharia*. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2000.
- MOREIRA, A. T. et al. O impacto da ação antrópica no meio ambiente: aquecimento global. *Revista Educação em Foco*, v. 14, p. 22–27, 2022.
- MORORÓ, V. C. Avaliação de desempenho e emissões de caldeiras de vapor híbridas aplicada à biomassa. 2016.
- NAGAOKA, M. d. P. T. et al. Análise de viabilidade econômica em co-geração de energia elétrica. *Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal, Garça, Ano V*, n. 9, p. 1–15, 2007.
- NETO, O. X. d. S. Energia renovável: reaproveitamento da biomassa da casca de arroz em caldeiras do tipo aquatubular. 2019.
- OLIVEIRA, L. L.; NEVES, G. G.; WAITMAN, P. L. Estudo sobre cogeração de energia elétrica no setor sucroalcooleiro. *REGRAD-Revista Eletrônica de Graduação do UNIVEM-ISSN 1984-7866*, v. 10, n. 01, p. 354–365, 2017.
- OLIVEIRA, L. L.; NEVES, G. G.; WAITMAN, P. L. Estudo sobre cogeração de energia elétrica no setor sucroalcooleiro. *REGRAD-Revista Eletrônica de Graduação do UNIVEM-ISSN 1984-7866*, v. 10, n. 01, p. 354–365, 2017.

- ORREGO, D. A. F. Análise da geração de eletricidade na matriz energética brasileira. 2014.
- PAULA, I. O. D. Modelagem termodinâmica e otimização numérica de um sistema de cogeração de uma usina sucroalcooleira. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2020.
- PAULINO, R. F. S. Incorporação de novas tecnologias no setor sucroalcooleiro: produção de hidrogênio e aumento da oferta de eletricidade. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2014.
- PEREIRA, T. P. *Avaliação de opções e custos de mitigação das emissões de GEE utilizando a cana-de-açúcar*. Tese (Doutorado) — [sn], 2014.
- PICOLI, J. F. et al. Desempenho ambiental da cana-de-açúcar: avaliação regional do ciclo de vida. In: IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 10., 2016. GRAMADO ? Gramado, RS, 2016.
- PONCE, R. O. Avaliação do ciclo de vida dos sistemas de produção orgânico e convencional da cana-de-açúcar: um estudo comparativo. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2019.
- PRADO, T. G. F. *Externalidades do ciclo produtivo da cana-de-açúcar com ênfase na produção de energia elétrica*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2007.
- PRUZAESKY, F. C. Análise termodinâmica de sistemas de cogeração.
- QUIRINO, W. F. et al. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. *Revista da madeira*, n, v. 89, n. 100, p. 100–106, 2005.
- RIBEIRO, P. H. *Contribuição ao banco de dados brasileiro para apoio à avaliação do ciclo de vida: fertilizantes nitrogenados*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2009.
- RODRIGUES, L. d. N. Espectroscopia por ftir de variedades híbridas de bagaço de cana-de-açúcar pré-tratados para produção de etanol celulósico. 2012.
- SANTOS, F. A. et al. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. *Química nova*, SciELO Brasil, v. 35, p. 1004–1010, 2012.
- SANTOS, M. L. d. et al. Estudo das condições de estocagem do bagaço de cana-de-açúcar por análise térmica. *Química nova*, SciELO Brasil, v. 34, p. 507–511, 2011.
- SEGUNDO, V. B. d. S. Princípio de balanços termoenergéticos em caldeiras geradoras de vapor nas indústrias sucroalcooleiras. Tecnologia Sucroalcooleira, 2015.
- SHAPIRO, H. N.; MORAN, M. J. Princípios de termodinâmica para engenharia. *LTC, Ed*, v. 6, 2009.
- SILVA, C. R. A. da et al. A biomassa como alternativa energética para o brasil. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais (RBCIAMB)*, n. 02, p. 25–36, 2005.
- SILVA, C. R. A. da et al. A biomassa como alternativa energética para o brasil. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais (RBCIAMB)*, n. 02, p. 25–36, 2005.
- SILVA, D. B. T. V. da et al. Avaliação termodinâmica na cogeração de energia nas indústrias sucroalcooleiras. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental*, v. 13, n. 3, p. 01–06, 2019.
- SILVA, L.; FINZER, J.; BEGNINI, M. Cálculo da relação ar/combustível e a eficiência em caldeira alimentada com bagaço de cana-de-açúcar. 2018.

- SILVA, S. C.; JUNIOR, E. C.; COSTA, A. Conceitos fundamentais da propriedade termodinâmica exergia e exemplos de aplicação para análise de processos reais. *Enciclopédia Biosfera*, v. 8, n. 15, 2012.
- SILVEIRA, J. L. Cogeração. *Simpósio de Energias Alternativas, II., Anais...*, Guaratinguetá, 2009.
- SOARES, L. d. B. et al. Mitigação das emissões de gases efeito estufa pelo uso de etanol da cana-de-açúcar produzido no Brasil. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2009., 2009.
- SOUTO, T. J. M. P. et al. Viabilidade da bioeletricidade a partir da cana-de-açúcar. *Revista em agronegócio e meio ambiente*, v. 11, n. 2, p. 409–429, 2018.
- SOUZA, Á. L. S. D.; SOARES, S. T. O emprego da turbina a vapor em sistemas de cogeração de energia elétrica. 2019.
- USINAS, N. I. D. C. P. *GIL MESQUITA DE OLIVEIRA RABELLO QUEIROZ*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2008.
- WYLEN, G. V.; SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C. *Fundamentos da termodinâmica clássica*. São Paulo, SP: Editora Blucher, 1994.
- YAMAZAKI, S. Considerações termodinâmicas sobre regulação de estrangulamento e a regulação da quantidade de massa de vapor da turbina a vapor industrial de contrapressão, com estágios de velocidade, tipo Curtis. Universidade Federal de Itajubá, 1973.
- ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. *Termodinâmica*. 7. ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2013.