



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS



ROSA HELENA CÉSAR FREIRE DE SOUZA

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DO BAGAÇO DE CANA-DE-
AÇÚCAR *IN NATURA* E TORREFADO DURANTE O ARMAZENAMENTO EM
UMA USINA DE ETANOL**

João Pessoa

2023

PPGER/MESTRADO ACADÊMICO

ROSA HELENA CÉSAR FREIRE DE SOUZA

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DO BAGAÇO DE CANA-DE-
AÇÚCAR *IN NATURA* E TORREFADO DURANTE O ARMAZENAMENTO EM
UMA USINA DE ETANOL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em energias renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

Orientadora

Prof^a. Dr.^a Silvia Layara Floriani Andersen

Coorientador

Dr. Jean Constantino Gomes da Silva

João Pessoa

2023

ROSA HELENA CÉSAR FREIRE DE SOUZA

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DO BAGAÇO DE CANA-DE-
AÇÚCAR *IN NATURA* E TORREFADO DURANTE O ARMAZENAMENTO EM
UMA USINA DE ETANOL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em energias renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

Banca Examinadora:

Prof^a. Dr^a. Pollyana Caetano Ribeiro Fernandes – Departamento de Engenharia de Energias Renováveis (UFPB) – examinadora interna

Prof^a. Dr^a. Erika Adriana de Santana Gomes – Departamento de Tecnologia em Produção Sucroalcooleira (UFPB) – examinadora externa

Prof^a. Dr^a. Silvia Layara Floriani Andersen – Departamento de Engenharia de Energias Renováveis (UFPB) – orientadora

Dr. Jean Constantino Gomes da Silva – Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI/UNICAMP) – coorientador

**João Pessoa
2023**



ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

ATA n° 105 da Sessão de Defesa Dissertação do Mestrado Acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, Universidade Federal da Paraíba.

Ao vigésimo oitavo dia do mês de julho de dois mil e três foi instalada a Banca de Defesa de Dissertação do Mestrado Acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas de forma PRESENCIAL, as 09h00, no Sala de Multimídia do Centro de Ciências Sociais Aplicadas a que se submeteu a defesa pública de **ROSA HELENA CÉSAR FREIRE DE SOUZA**, matrícula **20211019920**, com o título **"AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR IN NATURA E TORREFADO DURANTE O ARMAZENAMENTO EM UMA USINA DE ETANOL"**. A Comissão Examinadora esteve constituída pelos professores: SILVIA LAYARA FLORIANI ANDERSEN (UFPB), JEAN CONSTANTINO GOMES DA SILVA (UNICAMP) e POLLYANA CAETANO RIBEIRO FERNANDES (UFPB) e ERIKA ADRIANA DE SANTANA (UFPB). Concluídos os trabalhos de apresentação e arguição, o(a) candidato(a) foi APROVADA pela Comissão Examinadora. E, para constar, foi lavrada a presente ata, assinada pelos membros da Comissão.

Observações: FAZER CORREÇÕES E SEGUIR SUGESTÕES DA BANCA.

Membros da Banca Examinadora:

Silvia Layara Floriani Andersen

Prof.ª, Dr.(a) SILVIA LAYARA FLORIANI ANDERSEN

Orientador(a)

 Documento assinado digitalmente
JEAN CONSTANTINO GOMES DA SILVA
Data: 01/08/2023 09:23:00-0300
Verifique em <https://verificador.br.gov.br>
Prof. Dr. JEAN CONSTANTINO GOMES DA SILVA
Coorientador(a)

Pollyana Caetano Ribeiro Fernandes

Prof.ª, Dr.ª. POLLYANA CAETANO RIBEIRO FERNANDES
Examinador(a) Interno(a)

Erika Adriana de Santana
Prof.ª, Dr.ª. ERIKA ADRIANA DE SANTANA
Examinador(a) Externo(a)

PPGER/CEAR/UFPB - Campus I, Caixa Postal 5115, CEP: 58051-900, João Pessoa - PB, Brasil.

Obs.(1): O discente deverá encaminhar a coordenação do PPGER, no prazo máximo de 45 dias a contar da data da defesa, os exemplares definitivos da dissertação.

Obs.(2): O docente deverá encaminhar a coordenação do PPGER, no prazo máximo de 20 dias a contar da data da defesa, o relatório de orientação para avaliação do colegiado.

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S729a Souza, Rosa Helena César Freire de.

Avaliação das propriedades energéticas do bagaço de cana-de-açúcar in natura e torrefado durante o armazenamento em uma usina de etanol / Rosa Helena César Freire de Souza. - João Pessoa, 2023.

78 f. : il.

Orientação: Silvia Layara Floriani Andersen.

Coorientação: Jean Constantino Gomes da Silva.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Energias renováveis. 2. Bagaço de cana-de-açúcar. 3. Armazenamento. 4. Processo de torrefação. 5. Propriedades energéticas. I. Andersen, Silvia Layara Floriani. II. Silva, Jean Constantino Gomes da. III. Título.

UFPB/BC

CDU 620.91(043)

AGRADECIMENTOS

A Deus pela oportunidade de chegar até aqui, por me sustentar em meio as dificuldades.

A minha família e a Kethllin por todo apoio durante esse processo todo do mestrado.

A professora Dr^a. Silvia Layara Floriani Andersen por todo auxílio, ensinamentos, conversas e paciência. Além de estar presente em todos os momentos de dificuldades no projeto.

A Dr. Jean Constantino Gomes da Silva pelo apoio, conversas e direcionamentos.

A usina parceira, na figura do gerente, por permitir o desenvolvimento do trabalho em suas instalações usando o seu bagaço.

Aos colaboradores da caldeira e do laboratório por todo auxílio e apoio no desenvolvimento do projeto.

A Jhonatan por toda a parceria no LabMAQ, por sempre me ajudar no que fosse possível.

As professoras Dr^a. Erika e Dr^a. Pollyana por fazerem parte da banca e contribuírem com o trabalho da melhor maneira possível.

*“Os sonhos não determinam o lugar que você
vai estar, mas produzem a força necessária
para o tirar do lugar em que está”*

Augusto Cury

RESUMO

A comercialização de energia pelo setor sucroalcooleiro está se tornando cada vez mais proeminente na matriz elétrica brasileira, e sua presença como produto na indústria cresce a cada ano. Grande parte dessa energia é gerada a partir da queima do bagaço resultante da moagem da cana-de-açúcar, e o excedente é enviado para pátios de armazenamento sem uma técnica ou planejamento adequados. Como resultado, milhões de toneladas de bagaço são degradadas no armazenamento, afetando suas características, especialmente as energéticas. Com o objetivo de evitar essa degradação e aumentar o poder calorífico do bagaço, são estudados pré-tratamentos, como a torrefação. Este trabalho tem como objetivo acompanhar e comparar as variações nas propriedades energéticas do bagaço de cana-de-açúcar *in natura* e torrefado ao longo do período de armazenamento. Os métodos de pesquisa envolvem caracterizações físico-químicas e térmicas das amostras de bagaço *in natura* e torrefado durante o armazenamento. O material e métodos pautam-se nas caracterizações físico-químicas e térmicas das amostras de bagaço *in natura* e torrefado durante o armazenamento. Os resultados demonstram um pátio com dimensões e temperaturas ambientes variadas, assim como, os valores cinzas, material volátil, carbono fixo e o teor de umidade, o qual foi de 15,05 a 79,90% e teve influência do tamanho das partículas da biomassa de até 43%. O poder calorífico do bagaço da esteira foi de $17,46 \pm 0,19$ a $19,37 \pm 1,98$ MJ.kg⁻¹ bem similar ao encontrado no pátio de estocagem de $17,50 \pm 0,33$ a $19,62 \pm 0,73$ MJ.kg⁻¹. O bagaço torrefado, por outro lado, foi trabalhado com 3 temperaturas de torrefação diferentes: 200, 250 e 300 °C, possibilitando um aumento no poder calorífico superior de até 52,62%. Contudo, no armazenamento houve um aumento nessa umidade, além da presença de material inorgânico do pátio que baixou o poder calorífico superior em 49,56%. Nas análises termogravimétricas, as degradações térmicas da hemicelulose, celulose e lignina ficam bem evidentes principalmente nos bagaços torrefados. Na combustão as características físico-químicas tiveram influência nos picos de temperatura e degradação das biomassas, onde a atmosfera oxidativa se mostrou mais oxidante nas amostras. Dessa forma, este estudo ressalta a importância das características do bagaço *in natura* para o processo de estocagem, além de contribuir para a qualidade do bagaço torrefado, cuja eficácia do PCS é atenuada pela temperatura e tempo de torrefação, sofrendo também influências climáticas e do ambiente em que é armazenado.

Palavras-chave: bagaço; armazenamento; torrefação; propriedades energéticas.

ABSTRACT

The commercialization of energy by the sugar and alcohol sector is becoming more and more prominent in the Brazilian electricity matrix, and its presence as a product in the industry grows every year. A large part of this energy is generated from the burning of bagasse resulting from sugarcane milling, and the surplus is sent to storage yards without adequate technique or planning. As a result, millions of tons of bagasse are degraded in storage, affecting its characteristics, especially energy ones. In order to avoid this degradation and increase the calorific value of the bagasse, pre-treatments such as roasting are studied. This work aims to monitor and compare the variations in the energy properties of fresh and roasted sugarcane bagasse over the storage period. The research methods involve physical-chemical and thermal characterizations of fresh and roasted bagasse samples during storage. The material and methods are based on the physical-chemical and thermal characterizations of fresh and roasted bagasse samples during storage. The results show a courtyard with different dimensions and ambient temperatures, as well as the ash values, volatile material, fixed carbon and the moisture content, which ranged from 15.05 to 79.90% and was influenced by the particle size of the biomass of up to 43%. The calorific value of the bagasse from the mat ranged from 17.46 ± 0.19 to 19.37 ± 1.98 MJ.kg⁻¹, very similar to that found in the stockyard from 17.50 ± 0.33 to 19.62 ± 0.73 MJ.kg⁻¹. The roasted bagasse, on the other hand, was worked with 3 different roasting temperatures: 200, 250 and 300 °C, allowing an increase in the higher calorific value of up to 52.62%. However, in storage there was an increase in this humidity, in addition to the presence of inorganic material from the yard, which lowered the higher calorific value by 49.56%. In thermogravimetric analyses, the thermal degradation of hemicellulose, cellulose and lignin are very evident, mainly in roasted bagasse. In combustion, the physical-chemical characteristics influenced the temperature peaks and biomass degradation, where the oxidative atmosphere was more oxidizing in the samples. Thus, this study emphasizes the importance of the characteristics of bagasse in natura for the storage process, in addition to contributing to the quality of the roasted bagasse, whose effectiveness of PCS is attenuated by temperature and roasting time, also suffering climatic and environmental influences. in which it is stored.

Keywords: bagasse; storage; torrefaction; energetic properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Celulose, Hemicelulose e Lignina	16
Figura 2- Estrutura química da celulose e suas ligações de hidrogênio: estrutura básica de uma cadeia de celulose (a); ligações de hidrogênio na celulose (b).....	17
Figura 3- Estrutura representativa da hemicelulose do tipo xilana	18
Figura 4- Comparação entre oferta de energia elétrica por usinas de bagaço de cana e por usinas com bagaço de cana consorciado a cavaco de madeira	21
Figura 5- Matriz Energética Brasileira de Oferta Interna de Energia.....	22
Figura 6- Matriz Energética Brasileira de Oferta Interna de Energia de 2012 até 2022	22
Figura 7- Dimensionamento do pátio em outubro de 2022	32
Figura 8- Dimensionamento do pátio em dezembro de 2022.....	33
Figura 9- Dimensionamento do pátio em fevereiro de 2023	33
Figura 10- Ponto 1 do mês de outubro de 2022.....	34
Figura 11- Ponto 1 do mês de fevereiro de 2023.....	34
Figura 12- Ponto 1 do mês de dezembro de 2022	35
Figura 13- Pontos 2 e 2.1 do pátio de estocagem do mês de outubro de 2022.....	35
Figura 14- Pontos 2 e 2.1 do pátio de estocagem do mês de dezembro de 2022	36
Figura 15- Pontos 2 e 2.1 do pátio de estocagem do mês de fevereiro de 2023.....	36
Figura 16- Tonalidades do bagaço no ponto 2.1 no mês de fevereiro de 2023	37
Figura 17- Pontos 3 e 3.1 do pátio de estocagem no mês de outubro de 2022.....	37
Figura 18- Pontos 3 e 3.1 no pátio de estocagem do mês de dezembro de 2022	38
Figura 19- Pontos 3, 3.1 e 4 no pátio de estocagem do mês de fevereiro 2023	38
Figura 20- Pontos 4 e 4.1 no pátio de estocagem no mês de outubro 2022	39
Figura 21- Pontos 4 e 4.1 do pátio de estocagem do mês de fevereiro de 2023.....	39
Figura 22- Ponto 5 no pátio de estocagem do mês de outubro de 2022	40
Figura 23- Pátio de estocagem após o fim da moagem 22/23 (a); Pátio de estocagem no mês de fevereiro de 2023 (b)	41
Figura 24- Partículas de bagaço presentes em cada ponto de coleta	43
Figura 25- Pontos do pátio de estocagem: Ponto 3.1 (a) e Ponto 2.1 (b)	45
Figura 26- Torrefação a 200 °C (a); Torrefação a 250 °C (b); Torrefação a 300 °C (c)	50
Figura 27- Rendimentos percentuais de massa nas temperaturas de 200, 250 e 300 °C (a); Rendimentos percentuais de energia nas temperaturas de 200, 250 e 300 °C (b)	51
Figura 28- Poder calorífico do bagaço in natura e após torrefação nas temperaturas de 200, 250 e 300 °C	52
Figura 29- Potes de bagaço torrefados no pátio da usina	53
Figura 30- TG e DTG do bagaço do dia 10/10/2022 e 24/10/2022.....	55
Figura 31- TG e DTG do bagaço do dia 10/10/2022 in natura e torrefado a 200, 250 e 300 °C	57
Figura 32- Comportamento da combustão do bagaço in natura do dia 10/10/2022 e dos seus bagaços torrefados a 200, 250 e 300 °C.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Temperatura média do ambiente de cada ponto de amostragem.....	41
Tabela 2- Análise imediata do bagaço da esteira ao longo dos meses	42
Tabela 3- Análise da umidade dos pontos de coleta ao longo dos meses	44
Tabela 4- Análises de cinzas dos pontos de coleta ao longo dos meses.....	45
Tabela 5- Análise de materiais voláteis dos pontos de coleta ao longo dos meses	47
Tabela 6- Análise de carbono fixo dos pontos de coleta ao longo dos meses	48
Tabela 7- Poder calorífico superior do bagaço da esteira ao longo dos meses	49
Tabela 8- Poder calorífico superior do bagaço nos pontos de coleta ao longo dos meses	49
Tabela 9- Percentual de umidade e poder calorífico dos bagaços torrefados antes e durante os 3 meses de estocagem na usina.....	53
Tabela 10- Diferenças de temperatura e perda de massa das DTG do dia 10/10/2022 e 24/10/2022	56
Tabela 11- Picos de temperatura e perda de massa no bagaço do dia 10/10/2022 in natura e torrefado a 200, 250 e 300 °C	58

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

TG – Termogravimetria

DTG – Diferencial Termogravimétrico

U – Umidade

MV – Material Volátil

Z – Cinza

CF – Carbono Fixo

PCS – Poder Calorífico Superior

PCI – Poder Calorífico Inferior

BCA – Bagaço de cana-de-açúcar

ONU – Organização das Nações Unidas

COP-27 – 27ª Conferência da ONU sobre Mudanças Climáticas

AESA – Agência Executiva de Gestão das Águas

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVO	13
2.1 Objetivo Geral	13
2.2 Objetivos Específicos	13
3. REFERENCIAL TEÓRICO	14
3.1 Cana-de-Açúcar	14
3.2 Bagaço de Cana-de-açúcar	15
3.3 Atual processo de produção de energia proveniente do bagaço de cana-de-açúcar	18
3.4 Energia proveniente do bagaço de cana-de-açúcar	20
3.5 Armazenamento do bagaço de cana-de-açúcar	23
3.6 Torrefação	24
3.7 Técnicas de caracterização do bagaço	26
3.7.1 Análises Imediatas	26
3.7.2 Análises Térmicas	26
3.7.2.1 Poder calorífico	26
3.7.2.2 Termogravimetria	27
4. MATERIAL E MÉTODOS	29
4.1 Dimensionamento do pátio de bagaço e amostragem	29
4.2 Análise Imediata	29
4.3 Análise do poder calorífico superior	30
4.4 Torrefação	30
4.5 Análise termogravimétrica	31
4.6 Comportamento da combustão	31
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
5.1 Dimensionamento do pátio e amostragem	32
5.2 Análise Imediata	42
5.3 Poder calorífico Superior	48
5.4 Torrefação	50
5.5 Análise Termogravimétrica	55
5.6 Comportamento da Combustão	59
6 CONCLUSÃO	62
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	64
8 REFERÊNCIAS	65

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos países agrícolas mais importantes do mundo que tem dentre os seus diversos agroprodutos, a cana-de-açúcar, sendo um dos principais desde as últimas décadas. A estrutura de produção das usinas de etanol e açúcar possuem variações de acordo com o produto a ser produzido. Quando o processo produtivo abrange os dois de forma integrada possibilita uma abrangência de mercado, lucros diversificados e uma maior quantidade de resíduos a serem aproveitados. Essa integração surgiu com a necessidade urgente de expansão da produção de etanol após o lançamento do Programa Brasileiro do Álcool (Proálcool) em 1975 (SOCCOL *et al.*, 2010; DIAS *et al.*, 2015).

O setor sucroalcooleiro brasileiro desempenha um papel muito importante na economia nacional, sendo o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, em que na safra 2022/2023, foi responsável pela produção de 610,1 milhões de toneladas de cana destinadas à produção de açúcar e etanol (CONAB, 2023). Este mercado apresenta um enorme potencial de expansão, uma vez que a emissão dos gases do efeito estufa tem aumentado de maneira alarmante desde o início da revolução industrial. Esse cenário ressalta a necessidade de diversificar as fontes de energia. De acordo com os dados do Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Observatório do Clima (SEEG), o Brasil registrou a emissão de 2,42 bilhões de toneladas de CO₂ em 2021, o que tornou o país responsável pela maior alta na emissão de gases de efeito estufa em 20 anos, como relatado durante a COP-27, a conferência da ONU sobre o clima (ISA, 2022).

No entanto, ao longo dos anos, a indústria sucroalcooleira tem passado por transformações significativas, buscando aprimorar seus processos produtivos para reduzir os custos e, ao mesmo tempo, demonstrar uma crescente preocupação com os impactos ambientais gerados por suas atividades (CARDOSO *et al.*, 2019). O processamento industrial da cana-de-açúcar gera uma série de subprodutos e resíduos, como o bagaço, a palha, a vinhaça e a torta de filtro. Contudo, é importante ressaltar que a recuperação e aproveitamento desses resíduos representam uma oportunidade significativa para o desenvolvimento de novos produtos em diversas áreas de aplicação, além de contribuir para a preservação do meio ambiente. Essa abordagem também está alinhada com a crescente tendência da economia circular, que busca minimizar o desperdício e valorizar ao máximo os recursos disponíveis (TEIXEIRA *et al.*, 2021).

Segundo Avdiushchenko e Zajac (2019), a economia circular oferece uma oportunidade de repensar os sistemas econômicos existentes para aumentar a eficiência e transformar resíduos em recursos. Um exemplo perfeito disso é o bagaço de cana, o qual, segundo Gomes (2019), é um resíduo lignocelulósico fibroso gerado durante a operação de extração do caldo da cana. Uma parte dele normalmente é enviada às caldeiras como combustível e a outra parte é direcionada para o pátio de armazenamento.

As fontes renováveis representam 78,1% da oferta interna de eletricidade no Brasil (BEN, 2022). A produção de energia através da cogeração de bagaço é um empreendimento energético eficaz que pode gerar um quarto da demanda de energia dos principais países produtores de cana-de-açúcar do mundo (ARSHAD; AHMED, 2016). Além disso, no Brasil, o período de safra nas usinas coincide com os períodos em que a capacidade de geração hidrelétrica brasileira está sob estresse devido à redução do nível da água pelas baixas chuvas (HOFSETZ; SILVA, 2012). Contudo, existe a importância de se conhecer de forma efetiva as características do bagaço de cana-de-açúcar a ser utilizado pois este tem características diferentes o que leva a valores energéticos que variam de 17 a 20 MJ.kg⁻¹ dependendo da natureza e da forma armazenada (GROTTO *et al.*, 2021; ANUKAM *et al.*, 2016).

O armazenamento é fundamental devido à sazonalidade da produção e ao interesse na utilização do bagaço para cogeração de energia. No entanto, atualmente, não há técnicas ou planejamento adequado na sua estocagem, o que resulta em um impacto direto em seu potencial energético ao longo do tempo, levando mais de 1.500.000 toneladas a serem desperdiçadas anualmente (SALEHI *et al.*, 2012; CORREIA *et al.*, 2020). Diante dessa problemática, diversos métodos estão sendo testados, e um dos mais promissores é o pré-tratamento com torrefação. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é investigar a torrefação como um pré-tratamento alternativo e acompanhar a variação das propriedades físico-químicas e térmicas do bagaço de cana-de-açúcar, tanto *in natura* como torrefado, ao longo do período de armazenamento.

2. OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é avaliar ao longo do tempo de armazenamento as variações das propriedades físico-químicas e térmicas do bagaço de cana-de-açúcar *in natura* e torrefado.

2.2 Objetivos Específicos

- Acompanhar as mudanças do pátio de armazenamento a cada 2 meses e o que elas podem acarretar as características energéticas do bagaço de cana-de-açúcar;
- Caracterizar as propriedades físico-químicas do bagaço de cana-de-açúcar através da umidade, material volátil, cinzas e carbono fixo;
- Caracterizar as propriedades térmicas do bagaço de cana-de-açúcar através do poder calorífico e termogravimetria (TG);
- Realizar a torrefação com variação de temperaturas: 200, 250 e 300 °C e permanência por 1h na mufla.
- Acondicionar o bagaço torrefado por 3 meses, no mesmo ambiente que é estocado o bagaço *in natura*, para acompanhamento da umidade e poder calorífico durante o armazenamento;
- Caracterizar o bagaço torrefado através das propriedades térmicas: poder calorífico e termogravimetria (TG).
- Realizar a combustão na amostra *in natura*, que teve o melhor PCS, e nas suas respectivas amostras torrefadas para melhor compreensão da influência das propriedades físico-químicas nesse processo.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Cana-de-Açúcar

A cana-de-açúcar, pertencente ao gênero *Saccharum* da família Poaceae, é uma planta semiperene com notável acúmulo de sacarose em seus colmos. Essas características conferem uma significativa importância comercial às lavouras canavieiras, que cultivam variedades interespecíficas sob a denominação *Saccharum spp* (RIPOLI; RIPOLI, 2006). Introduzida no Brasil em 1532, a cana-de-açúcar encontrou condições climáticas, de solo, temperatura e relevo extremamente favoráveis. Esse contexto se alinhava ao desejo dos colonizadores portugueses de manter o território e extrair grandes riquezas, como acontecia no lado oeste do tratado de Tordesilhas (RODRIGUES; ROSS, 2020). Assim, rapidamente a cultura da cana-de-açúcar se tornou fundamental na produção de açúcar destinado à exportação para a Europa (MIRANDA; PIVETTA; FRACASSO, 2008).

O sucesso da cana-de-açúcar no país deve-se à sua notável adaptação às condições climáticas e de solo. De acordo com Lara (2021), sua morfoanatomia é desenvolvida em resposta ao manejo hídrico: as raízes fasciculadas, que são naturalmente finas e ramificadas, têm a importante função de fornecer água e nutrientes para o colmo. No colmo, encontramos os nós, onde se localizam as gemas que darão origem aos brotos, responsáveis pelo desenvolvimento dos perfilhos. Quanto às folhas, estas são alternadas e firmemente presas aos nós por meio de suas bainhas foliares na parte inferior. O processo de fotossíntese, por sua vez, produz compostos orgânicos estáveis de quatro carbonos que influenciam diretamente na eficiência fotossintética (SANTOS *et al.*, 2015).

No entanto, sob estresse hídrico, as folhas da cana-de-açúcar podem murchar, amarelar e enrolar, resultando em uma diminuição no crescimento da planta (LARA, 2021; SANTOS *et al.*, 2015). Apesar desses desafios, a expansão da cultura tem sido rápida e consistente ao longo das décadas. Esse sucesso se deve não somente à adaptabilidade natural da cana, mas também aos resultados positivos do programa de melhoramento genético. Esse programa tem lançado variedades de cana-de-açúcar cada vez mais produtivas, resistentes a estresses bióticos e abióticos, e adaptadas a diversos ambientes de cultivo, como é o caso da cana energia (AMARAL; SANTOS; BARBOSA, 2015).

A cana energia é caracterizada por uma maior produção por hectare, podendo chegar a mais de 180 toneladas, e apresenta uma longevidade superior, permitindo a renovação da lavoura após dez anos (JUNIOR, 2016). Além disso, Oliveira (2016) destaca que essa variedade é mais resistente às secas e possui uma maior capacidade de absorção de nutrientes e desenvolvimento. Estima-se que até 2030, as cultivares de cana energia possam aumentar significativamente a produtividade energética anual, chegando a mais de 1.200 GJ/ha em comparação com os 628 GJ/ha atuais (LANDELL *et al.*, 2010).

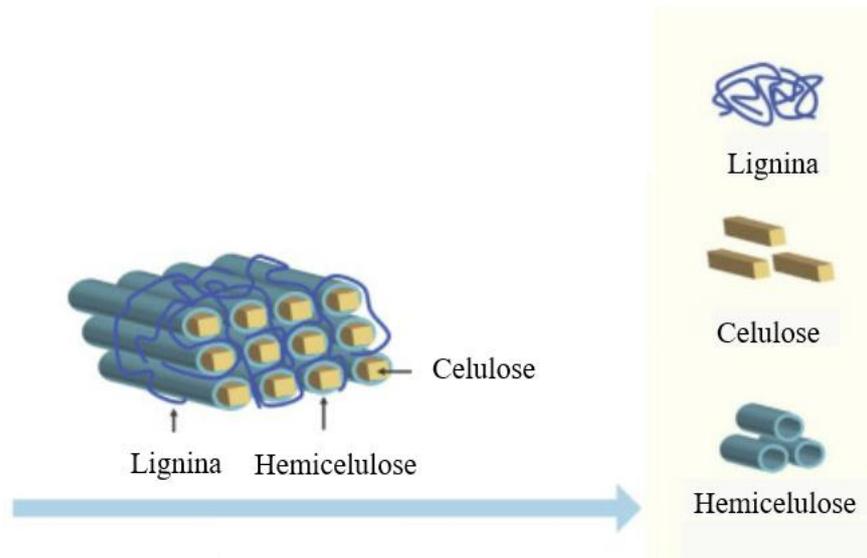
Estima-se que na safra de 2022/2023 no Brasil sejam produzidas 572.874,9 mil toneladas de cana-de-açúcar, em que cada tonelada gera entorno de 280 kg de bagaço (CONAB, 2022; CANGUSSU *et al.*, 2021). No mundo, cerca de 448 a 540 milhões de toneladas métricas desse subproduto agroindustrial celulósico são geradas a cada ano sendo mais que suficiente para a autossuficiência da indústria, para a geração de energia elétrica, para a venda do excedente e para a estocagem no pátio (TORGBO; QUAN; SUKYAI, 2021).

3.2 Bagaço de Cana-de-açúcar

De acordo com Santos *et al.* (2011), o bagaço recém-moído apresenta composição aproximada de 50% de umidade, 45% de fibras lignocelulósicas, 2 a 3% de sólidos insolúveis, além de sólidos solúveis. Esse material é constituído principalmente por celulose (40–50%), hemicelulose (20–35%) e lignina (10–30%), responsáveis pelo seu elevado conteúdo energético (Figura 1) (YU *et al.*, 2015; TORGBO; QUAN; SUKYAI, 2021).

Contudo, a utilização energética do bagaço apresenta algumas desvantagens, tais como alto teor de umidade, elevado teor de oxigênio, natureza higroscópica, baixo poder calorífico e propriedades heterogêneas (TORGBO; QUAN; SUKYAI, 2021; MANATURA, 2020). Essas características também causam problemas durante o armazenamento, o que torna necessário buscar métodos de pré-tratamento e estocagem que otimizem e melhorem sua estabilidade energética (MANATURA, 2020).

Figura 1- Celulose, Hemicelulose e Lignina

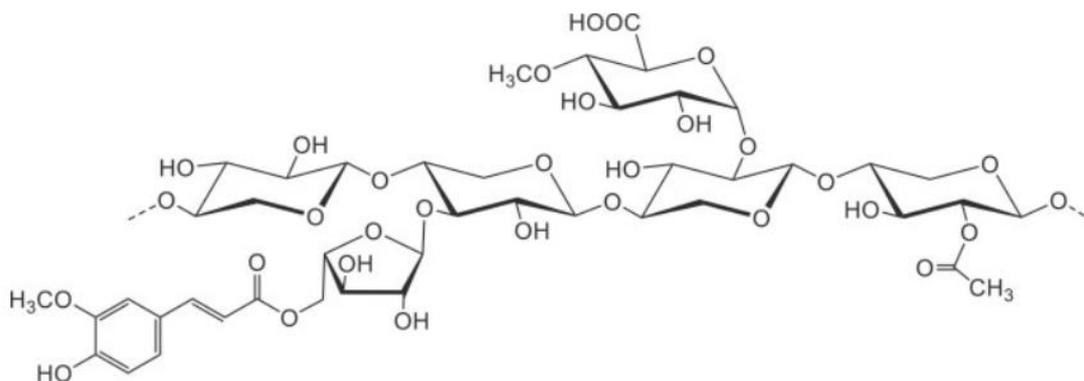


Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2022).

A celulose é um polissacarídeo identificado por sua cadeia linear de ligações glicosídicas, conforme ilustrado na Figura 2. Cada unidade de glicose monomérica possui três grupos hidroxila, o que resulta em extensas ligações de hidrogênio nas cadeias poliméricas. Essas ligações de hidrogênio conferem estabilidade à estrutura, tornando-a rígida. Os resíduos de celulose possuem um potencial imenso para a produção de energia e o armazenamento e recuperação de diversos produtos e ingredientes em aplicações alimentícias.

No entanto, a celulose apresenta alta resistência à degradação em comparação com outros carboidratos e essa característica pode ser um desafio para sua utilização eficiente em algumas aplicações (HIMMEL *et al.*, 2007; ANI *et al.*, 2022; KHOO; CHOW; ISMAIL, 2018; ACHARYA *et al.*, 2021).

Figura 3- Estrutura representativa da hemicelulose do tipo xilana



Fonte: Chen *et al.* (2022).

Conforme Upton e Kasko (2015), a lignina é um polímero amorfo composto por três monômeros fenilpropanóides (guaiacil (G), siringil (S) e p-hidroxifenil (H)), além do álcool caprílico (unidade C), ligados por ligações carbono-carbono e éter, os quais diferem no grau de metoxilação do anel aromático. Abdelaziz *et al.* (2016) demonstraram que essas estruturas podem ser representadas em sua forma alcoólica, como álcoois p-cumarílico, coniferílico e sinapílico. A lignina apresenta polímeros com comprimentos e ramificações desiguais, resultando em uma distribuição estrutural complexa. Além das características inerentes à composição da lignina na parede celular da planta, as mudanças estruturais também são influenciadas pelos diferentes processos de deslignificação e pré-tratamento (HUANG *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2022; SUN, 2020).

É importante destacar que a lignina proveniente do bagaço de cana-de-açúcar possui uma disponibilidade significativamente maior de energia térmica em comparação com outras culturas, podendo produzir até 1047×10^6 GJ.ano⁻¹ de energia (HORST; BEHAINNE; JUNIOR, 2017). Segundo Oliveira *et al.* (2020), a queima de uma tonelada métrica de bagaço resulta em uma contribuição energética normalizada de 7,6 GJ (40%) da celulose, 4,1 GJ (21%) da hemicelulose e 7,5 GJ (39%) da lignina.

3.3 Atual processo de produção de energia proveniente do bagaço de cana-de-açúcar

Na década de 1990, o setor industrial da cana-de-açúcar percebeu que as usinas tinham potencial para gerar diversos produtos além do açúcar e álcool, tornando-se, assim, uma

"Biorrefinaria de base biológica". Essa transformação permitiu a minimização e mitigação dos impactos ambientais (PARITOSH *et al.*, 2017; KUMAR; VERMA, 2021).

Flausinio *et al.* (2015) destacaram que, durante o século XX, a implantação das agroindústrias do setor sucroalcooleiro possibilitou a construção de usinas capazes de gerar sua própria energia elétrica, reduzindo os custos por meio do aproveitamento hidrelétrico e de combustíveis fósseis. As técnicas de integração de processos têm desempenhado um papel crucial nesse cenário, proporcionando maior eficiência na produtividade do processo, aumentando a rentabilidade e, ao mesmo tempo, reduzindo o uso de recursos ambientais e a geração de resíduos (OLIVEIRA *et al.*, 2018). Entretanto, essas transformações têm ocorrido de forma gradual. Um exemplo é a indústria de etanol de 2G, sendo a única unidade no Brasil pertencente à Raizen, que na safra de 2022/2023 produziu 30 milhões de litros de etanol. A meta da empresa é operar 20 plantas desse tipo no país até 2030 (EXAME, 2023).

A visão expandida da indústria tem levado a um crescimento anual significativo, resultando em uma quantidade crescente de bagaço sendo gerado e desperdiçado em seus pátios de armazenagem (BUCKERIDGE *et al.*, 2011). No entanto, o aproveitamento desse resíduo é crucial não apenas do ponto de vista ambiental, mas também como um substrato eficaz para a produção em larga escala de produtos que reforçam positivamente a economia circular, como a geração de energia (ALOKIKA *et al.*, 2021).

De acordo com Souza *et al.* (2018), a perspectiva e viabilidade da cogeração de energia elétrica, com base em uma unidade no Mato Grosso do Sul, dependem do gerenciamento entre produção, eficiência de geração e política de preço. Kamate e Gangavati (2009) afirmam que a pressão de trabalho da caldeira, a potência das turbinas a vapor e seu mecanismo de extração, seja de condensação ou contrapressão, influenciam diretamente o resultado da análise energética. Aguiar (2015) indica que, na safra 2013/2014, 39% das caldeiras em funcionamento utilizavam tecnologia de baixa pressão, até 21 bar; 34% operavam com pressão acima de 65 bar; 22% com pressão de até 48 bar; e 5% com pressão entre 48 e 65 bar. Além disso, quase 70% das usinas utilizavam turbogeradores de contrapressão simples, enquanto o modelo de extração e condensação era empregado em quase 30% delas.

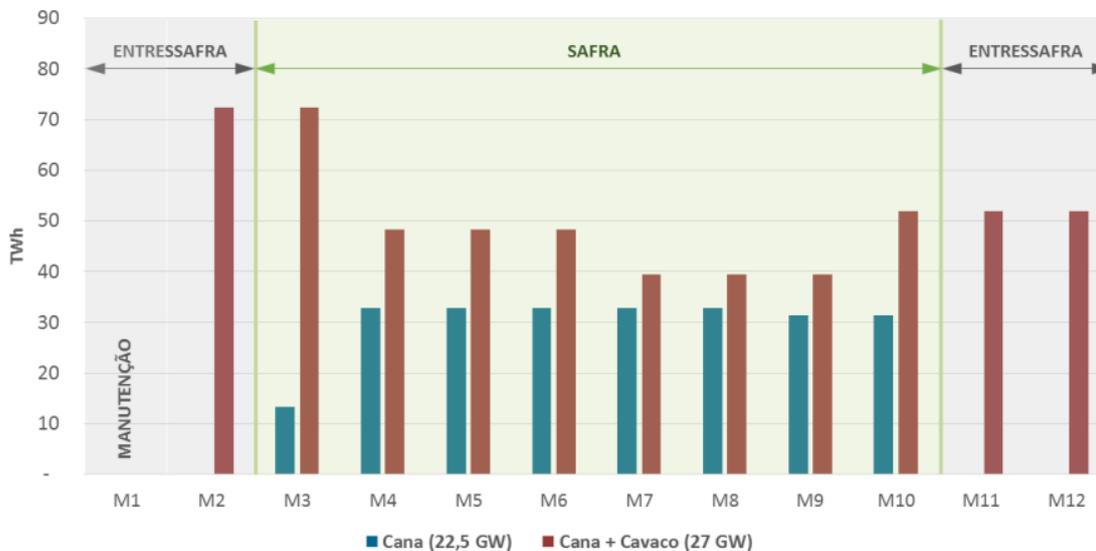
Em uma usina estudada por Peçanha *et al.* (2018), com um preço de mercado em MW de R\$ 385,00, precisando gerar 4,81 MW, o custo por tonelada de bagaço era de R\$ 40,00, e o custo por hora de operação era de R\$ 408,40. A receita obtida foi de R\$ 1.851,85 por hora, resultando em um lucro de R\$ 1.443,45 por hora.

As caldeiras utilizadas nas indústrias sucroalcooleiras são as aquatubulares, nas quais a água circula por dentro dos tubos e os gases quentes da combustão passam por fora dos tubos. Estes gases fornecem calor à água que está contida nos tubos, que servem para que a circulação da água e vapor seja efetiva no interior da fornalha para ganho de entalpia (BAZZO, 1995; LIMA, 2018). Elas possuem uma câmara de combustão, onde irá ocorrer a queima do combustível, a qual é projetada para queimar o bagaço com 50% de umidade, caso a umidade suba acima de 52% a maior parte do bagaço não seca e não queima em suspensão e se acumula na grelha (CARVALHO *et al.*, 2020).

3.4 Energia proveniente do bagaço de cana-de-açúcar

O potencial de bioenergia no mundo é grande o suficiente para atender à demanda global de energia até 2050. No entanto, garantir uma produção sustentável e um fornecimento adequado de biomassa ainda não está totalmente claro. Além disso, é essencial ter tecnologias em funcionamento que sejam econômicas e eficientes na transformação de biomassa bruta em bioprodutos valiosos com as propriedades desejadas (MOUSA *et al.*, 2016). Na Figura 4, o Ministério de Minas e Energia (2020) apresentou simulações da geração de energia a partir da biomassa de cana-de-açúcar, bem como da sua combinação com cavaco de madeira ao longo do ano. Isso evidencia a possibilidade de o bagaço gerar energia por um período além da safra, visto que há estoques disponíveis, bem como palhas e pontas que podem ser aproveitadas. O desenvolvimento de tecnologias eficazes e sustentáveis para o uso da biomassa é fundamental para maximizar seu potencial como fonte de energia renovável e contribuir para um futuro mais sustentável.

Figura 4- Comparação entre oferta de energia elétrica por usinas de bagaço de cana e por usinas com bagaço de cana consorciado a cavaco de madeira



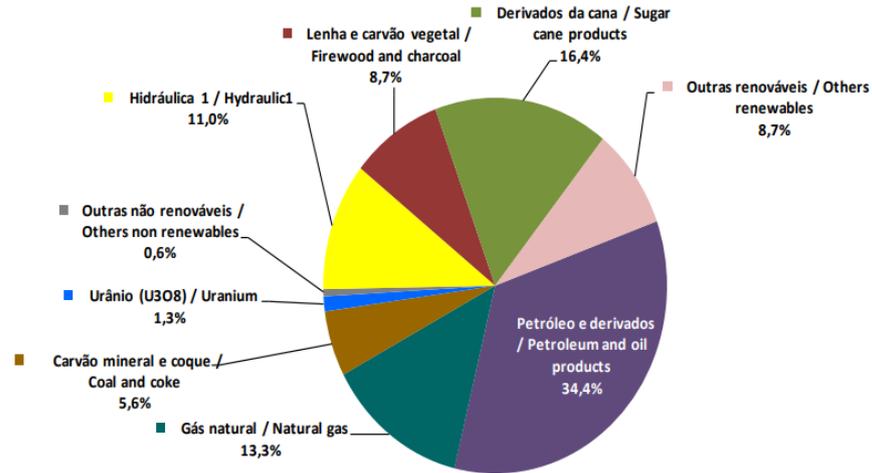
Fonte: Ministério de Minas e Energia (2020).

A indústria de energia elétrica passou por uma mudança de paradigma tecnológico com a gradativa substituição da geração centralizada pela geração distribuída. Desta forma, a desverticalização do setor permitiu a inserção da bioeletricidade no mercado elétrico brasileiro (CASTRO; DANTAS, 2008). A utilização do bagaço para fins energéticos pode garantir a autossuficiência energética de uma indústria, com a possibilidade de vender o excedente de eletricidade autogerada e obter benefícios econômicos (CAVALCANTI; CARVALHO; SILVA, 2020). Em 2017, a capacidade de geração de energia elétrica a partir do bagaço da cana-de-açúcar foi de 11,15 GW (LENÇO; QUINTERO; BIZZO, 2020). De acordo com Lisperguer *et al.* (2018), o bagaço gera energia com vantagens econômicas, ambientais e sociais. Isso foi destacado por Pérez *et al.* (2018), que buscou alternativas de reaquecimento e regeneração para sistemas de cogeração sucroalcooleira e obtiveram aumentos no excedente de bagaço e na eficiência energética. Assim como, Singh (2020), que aproveitou o calor residual cogerao para secar o bagaço e obter uma maior eficiência energética.

No entanto, os sistemas modernos de geração de energia devem ir além da análise apenas do desempenho termodinâmico e incluir avaliações ambientais, já que a energia fornece informações sobre a sua qualidade, o que é um ponto importante no aumento do uso de tecnologias verdes (CAVALCANTI; CARVALHO; SILVA, 2020). Na matriz energética

brasileira, Figura 5, é possível observar que a energia de biomassa da cana-de-açúcar ofertou, internamente, 16,4% da energia no país em 2021(BEN, 2022).

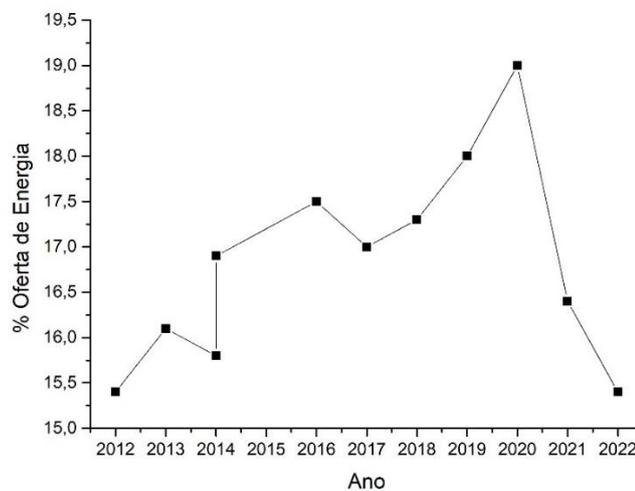
Figura 5- Matriz Energética Brasileira de Oferta Interna de Energia



Fonte: BEN (2022).

A Figura 6 deixa evidente que o uso da cogeração e o mercado de biocombustíveis apresentaram algumas oscilações, entre 2012 e 2022, o que foi devido aos mercados consumidores e os diferentes rendimentos das safras. Contudo, independentes dessas oscilações conseguiu-se manter uma faixa de porcentagem de oferta de energia interna entre 15 e 19% (FILOSO *et al.*, 2015; BEN, 2022).

Figura 6- Matriz Energética Brasileira de Oferta Interna de Energia de 2012 até 2022



Fonte: Adaptado de BEN (2022; 2023).

3.5 Armazenamento do bagaço de cana-de-açúcar

À medida que a indústria sucroalcooleira aumenta sua produção de etanol, os estoques de bagaço de cana-de-açúcar estão se tornando cada vez maiores, e, conseqüentemente, sua utilização também tem crescido. Esses estoques têm como finalidade garantir a continuidade do processo produtivo da empresa, seja para a produção de químicos ou bioenergia (BEZERRA, 2015). Conforme destacado por Dias (2010), os investimentos em estoque são necessários à medida que eles ganham importância na indústria. Um exemplo desse cenário foi o aumento do preço da tonelada de bagaço em 2021, que passou de R\$ 150 para R\$ 400 reais, motivado pela elevação da tarifa de energia elétrica, maior remuneração da bioeletricidade e escassez de pastagem para o gado devido à seca (CANA ONLINE, 2022).

Nesse contexto, as condições de armazenamento precisam de atenção e cuidado, pois uma estocagem deficiente pode levar a fatores que contribuem para a ineficiência de seu uso ao longo do tempo. É essencial garantir que o bagaço seja armazenado adequadamente para que possa ser aproveitado de forma eficiente em aplicações futuras. Na maioria das usinas brasileiras existe um pátio de armazenamento, no qual um trator espalha o bagaço no alto da pilha, a qual pode chegar a ter cerca de 300 m de extensão, 100 m de largura e 40 m de altura (SANTOS *et al.*, 2011; RAINEY *et al.*, 2013). Nestas, a deterioração da camada externa protege as camadas internas, gerando perdas e alterações na composição química da biomassa durante o tempo de armazenamento diferentes (NAKASHIMA *et al.*, 2017). Da mesma maneira ocorre com o bagaço armazenado em prédios internos e externos por vários meses antes da utilização (POSOM *et al.*, 2022).

Segundo Rainey *et al.* (2013), poeira, infiltração de águas subterrâneas, combustão espontânea e geração de lixiviados são possíveis impactos que os estoques de bagaço podem ter no meio ambiente e nas comunidades vizinhas. Além disso, a variedade de formas e tamanhos das partículas interferem nas áreas superficiais e volumétricas afetando os processos de transferência de calor e massa como a decomposição (PÉREZ *et al.*, 2018). As fibras menores são mais propensas a permanecer no ar durante operações típicas de estocagem de bagaço do que outras fibras. Além disso, ela preenche os vazios entre as partículas maiores de bagaço tornando o estoque menos poroso e retendo mais água. Em contrapartida, o bagaço inteiro armazenado resultará em menos emissões de poeira durante as operações de manuseio e em uma pilha de estoque com drenagem mais livre, possivelmente reduzindo a sua decomposição e a subsequente a sua lixiviação (RAINEY *et al.*, 2013). Conforme Valix,

Katyal e Cheung (2017), o bagaço só pode ser armazenado por no máximo 10 semanas, limitando seu uso posterior durante o período de não moagem. Buscando superar as desvantagens do uso da biomassa, o pré-tratamento com a torrefação vem sendo explorado e apresentando excelentes resultados sendo um produto mais bioestável e adequado para armazenamento empilhado ao ar livre (BACH; SKREIBERG, 2016; BARSKOV *et al.*, 2019).

3.6 Torrefação

A torrefação é um processo no qual submete a matéria a tratamento térmico a temperaturas de 200 a 300 °C na ausência de oxigênio. A definição de torrefação é comumente associada à pirólise leve, lenta ou pré-tratamento (CHEW; DOSHI, 2011). De acordo com Chen *et al.*, (2021), torrefação vem sendo desenvolvida como um método atraente de pré-processamento. Todavia, as melhorias de tais características devem ser realizadas sem a perda de quantidade significativa de energia na forma de produtos voláteis durante o processo de pré-tratamento (PEDROSO *et al.*, 2021).

O processo de torrefação pode ser úmido ou seco, onde a água quente e comprimida é usada para aquecer a biomassa na torrefação úmida, enquanto o uso de aquecimento direto ou indireto por meio de gás inerte quente é geralmente empregado na torrefação seca (ADELEKE *et al.*, 2020). Esse processo possui fases distintas: aquecimento, secagem, torrefação e resfriamento, sendo estes influenciados por fatores como temperatura e tempo de residência, taxa de aquecimento, composição atmosférica operacional, controle da instabilidade do processo de torrefação, tipo de reator e tamanho das partículas (RIBEIRO *et al.*, 2018; BERGMAN *et al.*, 2005). A temperatura precisa ser o mais estável possível para obter uma melhor qualidade do produto, enquanto a taxa de aquecimento implica nas características das reações de degradação e resultam nas diferentes distribuições de produtos sólidos, líquidos e gasosos ao fim do processo. O monóxido de carbono (CO) é o principal gás liberado durante o processo de torrefação e é formado durante a reação secundária entre vapor de água, CO₂ e produtos sólidos. Portanto, a razão entre CO₂ e CO diminui com o aumento do tempo de residência (RIBEIRO *et al.*, 2018; TUMULURU *et al.*, 2011; STELT *et al.*, 2011).

A torrefação foi dividida em três faixas: leve (200-235 °C), suave (235-275 °C) e severa (275-300 °C). Na torrefação leve, a decomposição da hemicelulose resulta na liberação de voláteis com pouca decomposição da celulose. Na torrefação severa, todas as diferentes estruturas de hemicelulose são quase que completamente esgotada e a celulose sofre

decomposição térmica. A lignina é o constituinte mais difícil de ser degradado termicamente dentro da faixa de temperatura de torrefação, portanto, seu consumo é muito baixo (CHEN; KUO, 2010; CHEN; PENG; BI, 2015).

Uma outra classificação é utilizada para representar as características de decomposição de polímeros orgânicos, sendo estes divididos em cinco temperaturas diferentes: 1° temperaturas na faixa de 50-120 °C, refere-se a secagem não reativo, ou seja, não ocorre alteração na composição química da biomassa, mas existe uma perda de umidade física; 2° temperaturas entre 120-150 °C, a lignina é afetada tornando-a útil como aglutinante; 3° que compreende as temperaturas entre 150-200 °C, é uma região que ocorre a despolimerização da hemicelulose, bem como o início da quebra das ligações hidrogênio-carbono; 4° temperaturas na faixa de 200-250 °C, representada pela torrefação da hemicelulose; 5° temperaturas entre 250-300 °C, onde ocorre uma decomposição maciça da hemicelulose para formar produtos voláteis e sólidos. Além disso, há apenas uma pequena quantidade de carbonização e volatilização pela celulose e lignina. Dessa maneira, ocorre a destruição total da estrutura celular da biomassa (BASU, 2013; TUMULURU *et al.*, 2011; CIOLKOSZ; WALLACE, 2011; BERGMAN *et al.*, 2005).

O rendimento sólido, poder calorífico e rendimento energético são os três índices cruciais para indicar o desempenho da torrefação. Após finalizado o processo de torrefação ocorre mudanças no bagaço, as quais são influenciadas pela temperatura e pelo tempo exposto a ela (RIBEIRO *et al.*, 2018). Consta-se um aumento percentual da quantidade de carbono e diminuição percentual das quantidades de oxigênio e hidrogênio (ARAUJO, 2018; MACHIN, 2015). A degradação natural da biomassa é prevenida pela diminuição da umidade, atribuindo ao material um caráter hidrofóbico, o que garante um transporte e estocagem mais segura e eficaz tendo como consequência a eliminação de odores e possibilidade de autocombustão (BASU, 2013; TUMULURU *et al.*, 2011; CIOLKOSZ; WALLACE, 2011; BERGMAN *et al.*, 2005).

O material resultante apresenta uma melhor padronização dimensional quando comparadas com o bagaço inicial tendo a hemicelulose e a celulose os principais constituintes decompostos termicamente na torrefação severa (PEDROSO *et al.*, 2021). Como consequência o peso e o rendimento energético da biomassa são reduzidos, embora a densidade de energia do combustível seja intensificada sendo capaz de produzir biocarvão (CHEN *et al.*, 2017; CHEN; PENG; BI, 2015). Por isso, após o tratamento, Machin (2015), destaca a sua empregabilidade como fonte de combustíveis em reatores próprios para carvão,

o que torna possível a gaseificação do material empregando tecnologias já dominadas e conhecidas previamente.

3.7 Técnicas de caracterização do bagaço

3.7.1 Análises Imediatas

As análises imediatas abordam o teor de umidades (U), o material volátil (MV), o teor de cinzas (Z) e carbono fixo (CF).

Por ser um material higroscópico, o bagaço tem a tendência de adsorver e perder umidade até atingir um equilíbrio dinâmico com o ambiente. Por isso, o teor de umidade afeta diretamente a estabilidade dimensional e durabilidade da biomassa. Desse modo, o teor de umidade é um parâmetro chave na caracterização da biomassa para produção de energia (ALÓ *et al.*, 2017; SALMINEN *et al.*, 2018).

A matéria volátil é o principal constituinte da biomassa em massa, o qual se baseia na quantidade de vapor condensável e não condensável liberados no processo de aquecimento de um combustível (BASU, 2010; MOUSA *et al.*, 2016).

As cinzas em grande quantidade são prejudiciais para o poder calorífico da biomassa. Elas são constituídas de composto de silício (Si), potássio (K), sódio (Na), enxofre (S), cálcio (Ca), fósforo (P), magnésio (Mg) e ferro (Fe). Durante o processo de combustão do bagaço, dependendo da temperatura e do tempo, pode produzir cinzas com diferentes tonalidades, além de afetar a forma estrutural, a quantidade e as características físicas da sílica (MATOS *et al.*, 2021; LENÇO; QUINTERO; BIZZO, 2020).

O teor de carbono fixo é calculado pela diferença do percentual total da amostra e o Teor de Cinzas e os Materiais Voláteis (MOUSA *et al.*, 2016).

3.7.2 Análises Térmicas

3.7.2.1 Poder calorífico

O poder calorífico é uma indicação da energia quimicamente ligada, como na biomassa, por exemplo, e no processo de combustão é convertida em energia térmica (EROL; HAYKIRI-ACMA; KÜÇÜKBAYRAK, 2010). A combustão é o principal processo de conversão de biomassa para extração da energia contida na mesma. A análise energética desse

sistema considera a energia associada aos fluxos de combustível e ar, além da reação química da combustão, transferência de calor para o fluido de trabalho, assim como, as perdas de energia representadas pelos gases de exaustão, cinzas, combustão parcial, purgas e fluxo de calor pelas fronteiras do equipamento. Em condições ambientais normais a biomassa não é auto inflamável, por isso, na combustão em caldeiras o bagaço de cana-de-açúcar é queimado em suspensão na fornalha, pois injetores pneumáticos possibilitam a formação de vórtice do combustível durante o processo da queima gerando assim um alto rendimento térmico de 85% a 87% (OYAMA, 2017). Contudo, é um processo complexo que consiste em consecutivas reações homogêneas e heterogêneas por meio de dois processos: completo e incompleto (FRANCISCO, 2012; JUNIOR, 2018; SALINAS *et al.*, 2020).

Na combustão completa, o combustível direcionado a caldeira, mistura-se ao oxigênio e tem a sua queima total. Na combustão incompleta esse processo não ocorre dessa forma, já que o combustível utilizado durante a queima não é aproveitado completamente. Sendo assim, ele é liberado pela chaminé em forma de fuligem, monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂) (SILVA; FINZER; BEGNINI, 2018; FERNANDES, 2019). Contudo, para a investigação da transferência de calor e massa requer a determinação de parâmetros cinéticos de combustão da biomassa (ERIC *et al.*, 2019).

O poder calorífico pode ser representado de duas formas: superior e inferior. O poder calorífico superior (PCS) representa a quantidade máxima de energia que pode ser obtida da transferência de calor do combustível, já que a água formada na combustão é completamente condensada. Já o poder calorífico inferior (PCI), a água formada pela combustão continua no estado de vapor (FIOMARI, 2004; NOGUEIRA; RENDEIRO, 2008).

3.7.2.2 Termogravimetria

De acordo com Denari e Cavalheiro (2012), a análise de termogravimetria acompanha a variação da massa da amostra em função do tempo e da temperatura. Uma técnica atraente para investigações das reações térmicas de uma ampla gama de substâncias inicialmente sólidas ou líquidas, sob condições controladas de temperatura e atmosfera, as quais permitem estimar os parâmetros cinéticos efetivos sob várias reações de decomposição e análises de gases evoluídos (ROJEK; WESOLOWSKI, 2021; JAYARAMAN *et al.*, 2018). Ela é feita em um equipamento composto por uma termobalança, a qual tem alguns componentes, como: controle de atmosfera do forno, balança registradora, forno, sistema registrador, programador

de temperatura de forno, suporte da amostra e sensor de temperatura (DENARI; CAVALHEIRO, 2012).

Na degradação térmica da biomassa é possível observar perdas de massa, as quais são maiores em amostras com maior teor de material volátil e menores teores de cinzas. A proporção da degradação térmica da biomassa depende da proporção em massa de seus principais componentes, como hemicelulose, celulose e lignina. A primeira queda na porcentagem de massa é observada até a temperatura de 110 °C e está relacionada com a saída de parte dos materiais voláteis e umidade presentes no bagaço cana-de-açúcar (MORAIS *et al.*, 2017; GROTTTO *et al.*, 2021).

A segunda queda de massa, observada na zona entre as temperaturas (120 e 330 °C), corresponde à degradação de celulose e hemicelulose. A hemicelulose, por exemplo, é de 190 a 300 °C, com taxa máxima de perda de massa a 250 °C e a celulose se decompõe na faixa de temperatura de 250 a 350 °C, com taxa máxima de perda de massa a 330 °C. A terceira queda de massa entre 330 e 600 °C, observa-se a degradação do polímero que exige maior quantidade de energia para a quebra das ligações, a lignina, a qual tem uma taxa máxima de perda de massa a 430 °C (MORAIS *et al.*, 2017; GROTTTO *et al.*, 2021; SANTOS *et al.*, 2011).

4. MATERIAL E MÉTODOS

O material utilizado no referido trabalho foi o bagaço de cana-de-açúcar, armazenado no pátio e produzido no dia da coleta, proveniente do processo de moagem de uma destilaria produtora de álcool anidro, hidratado e neutro, localizada em Pedras de Fogo na Paraíba.

As análises do referido trabalho foram feitas em triplicata e realizadas no Laboratório de Materiais e Química Ambiental (LabMaQ).

4.1 Dimensionamento do pátio de bagaço e amostragem

O dimensionamento do pátio de bagaço foi realizado a cada 2 meses durante a moagem da safra 22/23, considerando comprimento, largura e altura. Para visualizar e projetar o pátio, utilizou-se o software AutoCAD® 2023. O bagaço diário foi coletado da esteira no ponto de coleta existente na usina para análise de umidade. Os pontos de amostragem no pátio de armazenamento foram definidos após o dimensionamento, visando abranger toda a extensão e suas camadas. As amostras foram retiradas com uma profundidade mínima de 30 cm da superfície para garantir a isenção de elementos contaminantes eventuais da matéria-prima (CORREIA *et al.*, 2020).

A temperatura de cada ponto foi medida em cada coleta utilizando o termômetro digital *SBC Solution*, modelo FY-10.

4.2 Análise Imediata

O teor de umidade foi determinado na balança de umidade (*Moisture Analyzer*, MF-50) com a amostra úmida. Antes da realização da análise imediata a amostra foi seca na estufa com circulação de ar (Marconi, MA-035) por 1 hora a 105 °C e triturada em um liquidificador industrial. Posteriormente, ela foi peneirada em uma peneira de malha 100 mesh para padronização da granulometria do material com 150 µm. No mês de janeiro, a amostra começou a ser triturada no moinho de facas da Solab modelo SL-31 com a peneira de malha 100 mesh, pois o liquidificador estava apresentando dificuldades em triturar as amostras, as quais no final eram acondicionadas em um tubo de falcon de 50 mL. O teor de cinzas e o teor de material volátil, previamente secados na balança de umidade antes da realização das análises, foi determinado utilizando as normas ASTM E1755-01 e ASTM E872-82,

respectivamente. Os resultados encontrados foram utilizados para determinar o teor de carbono fixo (base seca), por diferença, de acordo com a norma da ABNT/NBR 8112.

4.3 Análise do poder calorífico superior

O poder calorífico superior da amostra foi determinado utilizando a bomba calorimétrica IKA (modelo C 200) seguindo a metodologia ASTM D5865.

4.4 Torrefação

Para o pré-tratamento com torrefação foi utilizado somente as amostras coletadas do bagaço da esteira, aproximadamente, 7 g dessas amostras foram pesadas em 3 cadinhos de porcelana com tampa na balança analítica da Shimadzu modelo ATY224. Elas foram inseridas, separadamente, no forno mufla utilizando 3 temperaturas diferentes: 200, 250 e 300 °C, a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min, permanecendo nessas temperaturas por 1 hora. Posteriormente, as amostras foram esfriadas e pesadas novamente para poder calcular os percentuais de rendimentos de massa e energéticos conforme a Equação 1 e 2, respectivamente (CHEN; KUO, 2010; CHEN; PENG; BI, 2015; BROJOLALL; SURROOP, 2022).

Em sequência, foi verificado o poder calorífico e realizado termogravimetria, em atmosfera inerte, conforme o item 4.5, antes de ser levado para o pátio de estocagem, no qual foi tirado uma alíquota a cada mês para acompanhamento da umidade e do PCS ao longo do tempo de armazenamento, com as mesmas metodologias informadas nos itens 4.2 e 4.3.

$$RM = \left(\frac{MT}{MN} \right) \times 100 \quad (1)$$

Onde:

RM: Rendimento de massa (%);

MT: Massa do bagaço torrefado (g);

MN: Massa do bagaço *in natura* (g).

$$RE = RM \times F \quad (2)$$

Onde:

RE: Rendimento energético (%);

RM: Rendimento de massa (%);

F: Fator de densidade de energia;

Segundo Brojollal e Surroop (2022), o fator de densidade de energia, pode ser calculado de acordo com a Equação 3, é proporcional à medida que a severidade da torrefação cresce, porque o poder calorífico do bagaço torrado aumenta.

$$F = \left(\frac{PCT}{PCC} \right) \quad (3)$$

Onde:

F: Fator de densidade de energia;

PCT: Poder calorífico do bagaço torrefado (MJ.kg^{-1});

PCC: Poder calorífico do bagaço *in natura* (MJ.kg^{-1}).

4.5 Análise termogravimétrica

As análises termogravimétricas foram realizadas em um analisador termogravimétrico simultâneo Discovery SDT 650 da TA Instruments. As amostras, com aproximadamente 10 mg, foram submetidas a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min, em atmosfera de N₂ (pureza de 99,99%) com fluxo constante de 100 mL/min, da temperatura ambiente até 1000 °C e deixando em isoterma, temperatura constante, por 30 minutos.

4.6 Comportamento da combustão

As análises de combustão foram realizadas com a amostra de bagaço da esteira, que teve a maior média do PCS, e nos seus bagaços torrefados a 200, 250 e 300 °C. Foi utilizado um analisador térmico simultâneo Discovery SDT 650 da TA Instruments. As amostras, com aproximadamente 10 mg, foram submetidas a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min em atmosfera de ar sintético (20% O₂ e 80% N₂ v/v) com fluxo constante de 100 mL/min, iniciando em temperatura ambiente até 1000 °C e deixando em isoterma por 30 minutos.

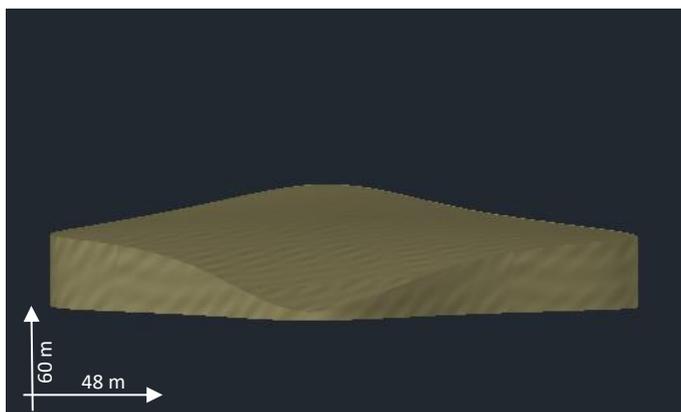
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Dimensionamento do pátio e amostragem

Nota-se que, em outubro de 2022, a disposição do bagaço na área de armazenamento não ocupava toda a sua extensão. No entanto, nos meses de dezembro de 2022 e fevereiro de 2023, o pátio passa por modificações, aumentando tanto em altura quanto em comprimento (Figuras 7, 8 e 9). Essa diferença de altura resultou na formação de duas camadas principais nas extremidades: a camada superior e a inferior. Essa divisão foi de extrema importância para o trabalho, pois após dezembro de 2022, o acesso à camada superior tornou-se inviável devido à altura e instabilidade do pátio, levantando preocupações com a segurança do trabalho.

Com base nesse dimensionamento, foram definidos os pontos de amostragem em cada extremidade formada e na parte central do pátio, permitindo abranger toda a área de estocagem. De acordo com Correia *et al.* (2020), a estocagem do bagaço da cana-de-açúcar geralmente carece de técnicas ou planejamento, o que pode levar a diferentes estágios de degradação da biomassa.

Figura 7- Dimensionamento do pátio em outubro de 2022



Fonte: Autor (2023).

Figura 8- Dimensionamento do pátio em dezembro de 2022



Fonte: Autor (2023).

Figura 9- Dimensionamento do pátio em fevereiro de 2023

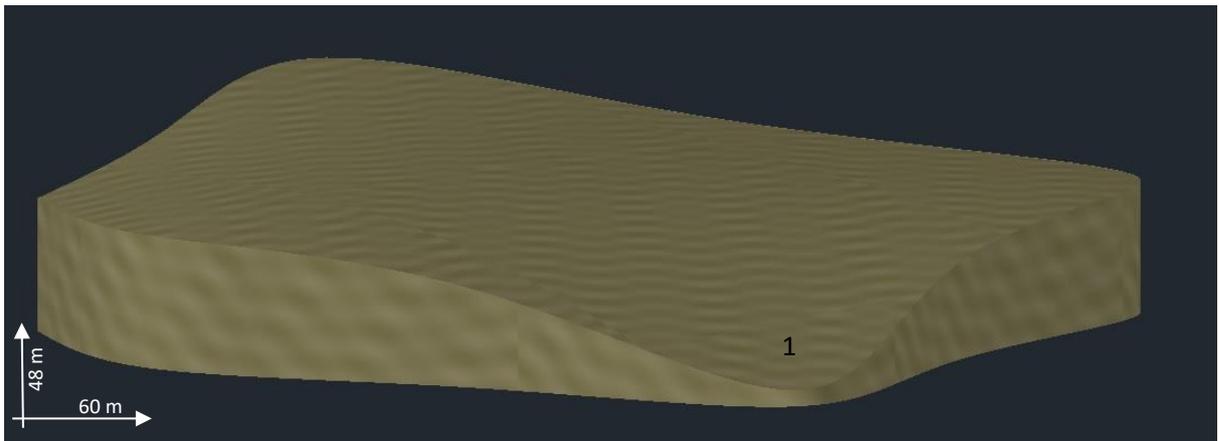


Fonte: Autor (2023).

O pátio de estocagem em outubro de 2022 apresentava dimensões de 60 m de comprimento por 48 m de largura. Ao final da safra, em fevereiro de 2023, suas dimensões aumentaram consideravelmente, atingindo 100 m de comprimento por 70 m de largura, representando um aumento de 66,66% e 45,83%, respectivamente. O mês de dezembro de 2022 foi o período de maior crescimento do estoque durante a safra, com um acréscimo de 12 m na largura e 20 m no comprimento. A altura do pátio variava ao longo de toda a extensão, chegando ao máximo de 14 m no final da moagem, principalmente por questões de segurança do operador da Michigan (pá carregadeira). Essas adaptações no pátio demonstram a capacidade da usina de ajustar-se às demandas operacionais, buscando a eficiência no armazenamento do bagaço e otimizando o uso dos recursos disponíveis. O monitoramento contínuo do pátio e sua flexibilidade no dimensionamento são fundamentais para a maximização da produtividade e a eficiência do processo.

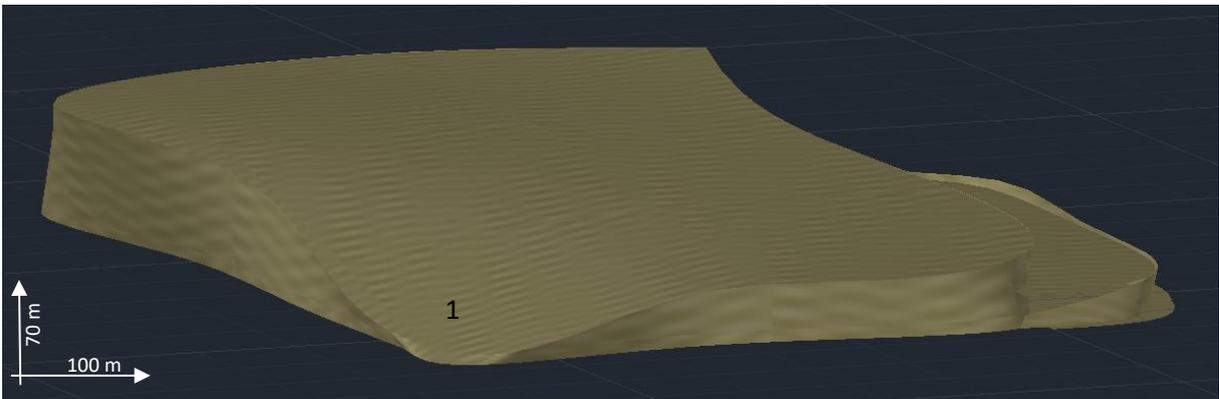
O ponto 1, como mostrado nas Figuras 10 e 11, marcava o início da estocagem do bagaço, mas sua constante adição no mesmo local exigia sua realocação. Nesse sentido, o papel do operador da Michigan se tornava crucial para organizar e distribuir o bagaço por toda a área destinada a esse fim. No entanto, essa movimentação acabava aumentando o contato direto do bagaço com o solo, além de arrastar uma quantidade significativa de matéria inorgânica para outras partes do pátio, já que a baixa altura do local criava uma rampa para a Michigan.

Figura 10- Ponto 1 do mês de outubro de 2022



Fonte: Autor (2023).

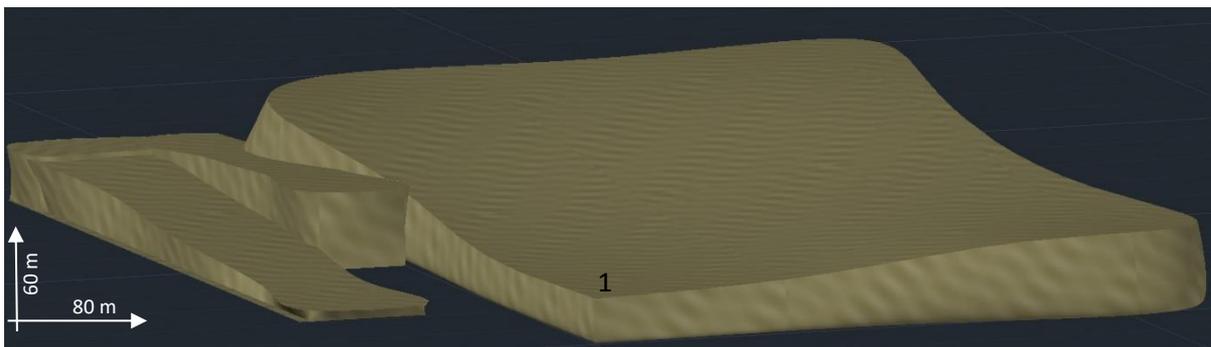
Figura 11- Ponto 1 do mês de fevereiro de 2023



Fonte: Autor (2023).

No entanto, é importante ressaltar que o *layout* em formato de "rampa" não é obrigatório, conforme ilustrado na Figura 12. Nessa representação, podemos perceber que a altura do ponto 1 é maior do que a altura observada entre os meses de outubro/2022 e fevereiro/2023, a qual foi de aproximadamente 2 m. Nesse contexto, a "rampa" foi construída em outro local, de melhor acesso naquele momento, e o acúmulo de bagaço nesse ponto era proporcional à velocidade da esteira de alimentação e ao tempo de deslocamento da Michigan no pátio armazenamento.

Figura 12- Ponto 1 do mês de dezembro de 2022



Fonte: Autor (2023).

Na Figura 13, no mês de outubro/2022 estão os pontos 2 e 2.1 que passaram por diferentes dimensionamentos ao longo da safra. Inicialmente com 7 m de altura e com uma distância em comprimentos do ponto 1 para o ponto 2 de 60 m. Esse lugar estava com bagaço do início do mês, e por enquanto, ninguém mexia na biomassa que estava ali.

Figura 13- Pontos 2 e 2.1 do pátio de estocagem do mês de outubro de 2022



Fonte: Autor (2023).

Na Figura 14, é notável o significativo aumento no volume do pátio, tanto em altura quanto, principalmente, em comprimento. Nesse período, a altura alcançou 10 m, e a distância entre o ponto 1 e o ponto 2 atingiu 80 m. Esse aumento foi resultado de poucas interrupções na produção, bem como da utilização eficiente do bagaço com média de eficiência térmica de 1 tonelada de bagaço produzindo 2 toneladas de vapor. Além disso, alguns caminhões de bagaço chegaram para descarregar nesse local, aproveitando o solo firme e seco, que oferecia espaço suficiente para o manejo adequado. Essas condições propiciaram a mudança no acesso da Michigan para a parte superior do pátio, resultando em um novo *layout*, conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 14- Pontos 2 e 2.1 do pátio de estocagem do mês de dezembro de 2022



Fonte: Autor (2023).

Em fevereiro (Figura 15), o *layout* do pátio passou por outra modificação, assemelhando-se à Figura 13, porém com uma altura de 12 m e a distância do ponto 1 ao ponto 2 aumentou para 100 m de comprimento. Nesse mês, observou-se visualmente que a coloração do bagaço estava mais escura, apresentando um tom mais barrento e úmido, embora essa cor não fosse uniforme, sendo mais pronunciada na camada interna. Na primeira camada, o tom era claro e mais seco, e apresentava partículas de fuligem (Figura 16).

De acordo com o estudo de Pattamasuwan *et al.* (2020), após cerca de 100 dias de armazenamento, o bagaço começa a apresentar variações na coloração, o que é coerente com os resultados obtidos neste trabalho, uma vez que o bagaço analisado tinha aproximadamente 120 dias de estocagem. Essas diferenças de coloração se intensificam com o aumento da profundidade de coleta, sendo um indicativo de que ácido acético foi gerado pelos microrganismos.

Figura 15- Pontos 2 e 2.1 do pátio de estocagem do mês de fevereiro de 2023



Fonte: Autor (2023).

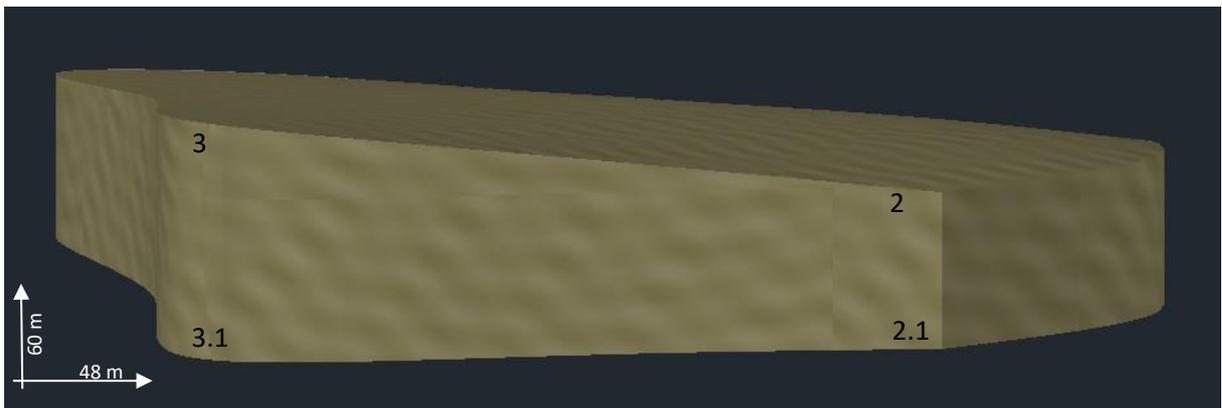
Figura 16- Tonalidades do bagaço no ponto 2.1 no mês de fevereiro de 2023



Fonte: Autor (2023).

O ponto 3, foi um lugar que teve algumas mudanças grandes de bagaço ao longo da safra, mas sempre teve a maior altura de todos os pontos de coleta. Na Figura 17, ele está com 10 m de altura e a distância para o ponto 2 é 48 m de comprimento, o que corresponde a largura do pátio em outubro/2022. Nesse momento, o bagaço presente era do início da safra, era o mais antigo no armazenamento, principalmente na camada mais baixa, a 3.1.

Figura 17- Pontos 3 e 3.1 do pátio de estocagem no mês de outubro de 2022



Fonte: Autor (2023).

No mês de dezembro (Figura 18), houve um aumento na altura do pátio para 12 m e a distância até o ponto 2 se estendeu a 60 m, principalmente devido ao acréscimo de bagaço nesse local. Esse acréscimo foi o principal responsável pelo maior crescimento no comprimento do pátio. Houve a possibilidade de ampliar o pátio nas áreas próximas aos

pontos 3 e 4, com um espaço disponível de aproximadamente 15 m. Entretanto, foi utilizado apenas 10 m dessa área, como mostrado na Figura 19, referente ao mês de fevereiro de 2023.

Essa área de ampliação foi escolhida estrategicamente, pois fica ao lado dos *sprays* da destilaria, tornando o ar e o solo muito úmidos. Portanto, houve uma preocupação da empresa em utilizar, durante as paradas da produção, primeiramente o bagaço presente nesse espaço. Após sua utilização, outro bagaço era colocado no mesmo lugar

Figura 18- Pontos 3 e 3.1 no pátio de estocagem do mês de dezembro de 2022



Fonte: Autor (2023).

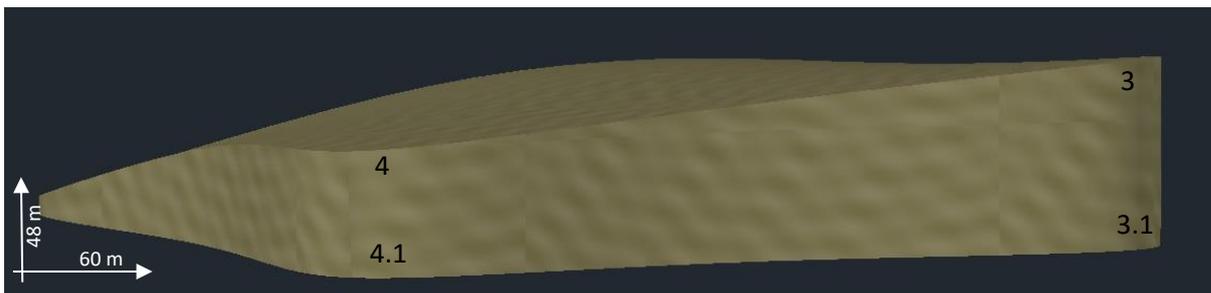
Figura 19- Pontos 3, 3.1 e 4 no pátio de estocagem do mês de fevereiro 2023



Fonte: Autor (2023).

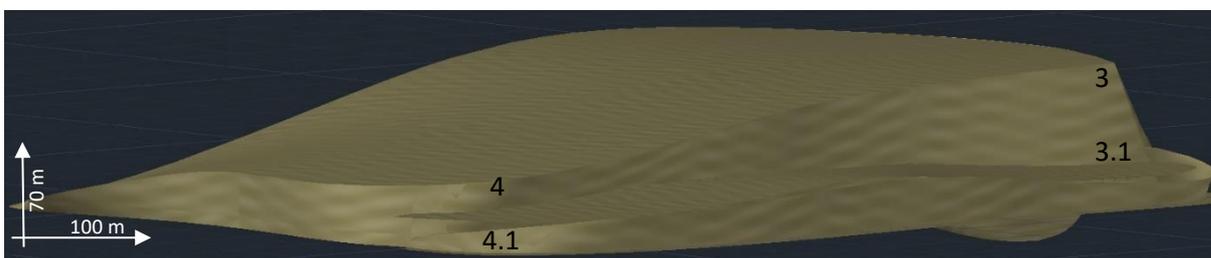
O ponto 4 era mais movimentado em comparação ao ponto 3, pois ficava ao lado da esteira responsável por transportar o bagaço do pátio para a caldeira. Dessa forma, a biomassa ali depositada era frequentemente utilizada, além de receber bagaço de outros pontos quando este era direcionado para a esteira. No final do mês de outubro de 2022 (Figura 20), o bagaço produzido durante esse período estava sendo colocado principalmente no ponto 4, diferentemente dos meses de dezembro/2022 e fevereiro/2023. A altura do pátio variou entre 8, 9 e 10 m, respectivamente, durante esses meses. Em fevereiro, devido ao período de final de safra e às muitas paradas na usina, a biomassa estocada no ponto 4 e nos 10 m ao lado dos pontos 3 e 4 foi bastante utilizada. Isso gerou uma diferença visual significativa em relação à altura do ponto 3 (Figura 21).

Figura 20- Pontos 4 e 4.1 no pátio de estocagem no mês de outubro 2022



Fonte: Autor (2023).

Figura 21- Pontos 4 e 4.1 do pátio de estocagem do mês de fevereiro de 2023



Fonte: Autor (2023).

No contexto da Figura 22, o ponto 5 representa o acúmulo de bagaço formado por uma mistura proveniente de diferentes meses, abrangendo o período entre agosto/2022 e fevereiro /2023. Ele foi progressivamente construído, adicionando-se uma nova camada de bagaço recente a cada mês subsequente. Conseqüentemente, a altura da pilha de bagaço aumentou gradualmente ao longo desse período, iniciando em aproximadamente 5 m de altura e alcançando cerca de 10 m ao final.

Ao contrário dos demais locais no pátio, que foram subdivididos em camadas distintas, o ponto 5 não seguiu essa prática. A decisão de não o dividir em camadas foi justificada pela complexidade associada à acessibilidade de sua camada inferior. O acesso a essa camada mais baixa demandaria a remoção de um grande volume de bagaço, o que tornou o processo complicado.

Figura 22- Ponto 5 no pátio de estocagem do mês de outubro de 2022

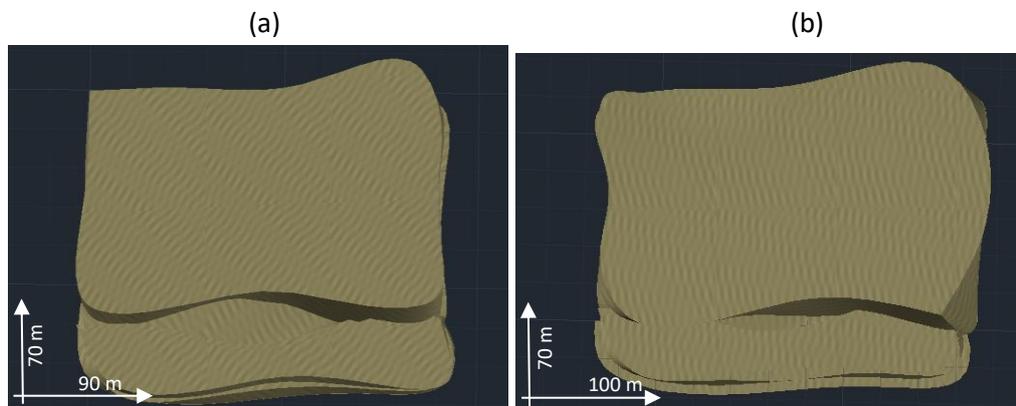


Fonte: Autor (2023).

Após o final da moagem, o pátio passou por suas últimas modificações (Figura 23). Nos últimos dias, devido a paradas na produção, uma quantidade significativa de bagaço do pátio foi utilizada, restando aproximadamente 9 toneladas ainda armazenadas. Além disso, o pátio foi recuado em 10 m, afastando-o das caldeiras. Esse reposicionamento do bagaço foi realizado, transferindo-o da área próxima às caldeiras para a parte superior do pátio e para a região dos pontos 3 e 4.

Essa movimentação de segurança é essencial, especialmente porque as caldeiras passam por manutenção. Dessa forma, caso alguma solda caia no chão, não haverá risco de combustão ao entrar em contato com o bagaço. Essa medida é importante para evitar potenciais riscos e garantir um ambiente seguro e adequado para a realização das atividades na usina. Adicionalmente, foi colocada uma lona sobre o bagaço no pátio para inibir a dispersão de suas partículas no ambiente mais próximo. Essa medida tem como objetivo reduzir a emissão de poeira e garantir um controle melhorado da qualidade do ar nas proximidades do pátio.

Figura 23-Pátio de estocagem após o fim da moagem 22/23 (a); Pátio de estocagem no mês de fevereiro de 2023 (b)



Fonte: Autor (2023).

A cada coleta de amostragem a temperatura foi verificada em graus Celsius, as médias dos valores encontrados estão na Tabela 1.

Tabela 1- Temperatura média do ambiente de cada ponto de amostragem

Ponto de Amostragem	Temperatura (°C)	Figuras de Referência
1	35,6	Figuras 10, 11 e 12
2	56,2	Figuras 13, 14 e 15
2.1	46,3	Figuras 13, 14 e 15
3	57,2	Figuras 17, 18 e 19
3.1	47,0	Figuras 17, 18 e 19
4	53,7	Figuras 20 e 21
4.1	49,1	Figuras 20 e 21
5	59,3	Figura 22

Fonte: Autor (2023).

De acordo com Pattamasuwan *et al.* (2020) e Gebbie *et al.* (2020), a temperatura do estoque de bagaço normalmente fica na faixa de 50 a 65 °C, o que é consistente com os valores encontrados em quase todos os pontos do estoque analisado. Pattamasuwan *et al.* (2020) também observou que ocorre um aumento na temperatura de cerca de 20 a 35 °C acima da temperatura ambiente logo a 0 metros de profundidade na pilha de estoque.

No entanto, o ponto 1 não alcança uma temperatura alta, uma vez que está constantemente em movimento e não apresenta camadas sucessivas de bagaço sobrepostas.

Essa movimentação constante não permite que o calor se acumule da mesma forma que acontece em outras partes do estoque, onde o bagaço fica depositado por mais tempo e cria camadas térmicas. Por essa razão, o ponto 1 mostra uma menor tendência de aumento significativo da temperatura em relação a outros pontos do estoque.

Uma temperatura elevada é motivo de preocupação, pois a combustão espontânea em estoques pode ocorrer na faixa de 60 a 65 °C, conforme mencionado por Pattamasuwan *et al.* (2020). Boonmee e Pongsamana (2017) explicam que a ocorrência da combustão espontânea é resultado da combinação de temperatura e teor de umidade, que provocam a liberação de energia do calor latente de condensação e calor de absorção. Além disso, conforme observado por Pattamasuwan *et al.* (2020), a atividade microbiológica também influencia esse aumento de temperatura devido às reações dos microrganismos.

Gebbie *et al.* (2020) identificaram a presença de 104 microrganismos em uma pilha de bagaço, sendo que os parentes dos fungos termófilos foram os mais abundantes nas camadas mais profundas, e as bactérias das espécies *Firmicutes*, *Bacillus* e *Alicyclobacillus* foram as mais prevalentes. Além disso, Peng *et al.* (2021) constataram em seu estudo que a temperatura de armazenamento teve um impacto de 34,7% na diversidade dos microrganismos, enquanto o tempo de armazenamento teve uma influência ainda maior, correspondendo a 73,7% do efeito observado.

5.2 Análise Imediata

Na Tabela 2 são apresentados os resultados da análise imediata realizada no bagaço da esteira ao longo dos meses.

Tabela 2- Análise imediata do bagaço da esteira ao longo dos meses

Amostras (%)	Umidade** (m/m)	Cinzas* (m/m)	Material Volátil* (m/m)	Carbono Fixo* (m/m)
10/10/2022 (A1)	57,23 ± 4,66	3,25 ± 0,07	81,69 ± 0,21	15,05 ± 0,27
24/10/2022 (A2)	49,82 ± 1,43	3,78 ± 0,73	80,86 ± 0,26	15,36 ± 0,50
21/11/2022 (A3)	54,91 ± 5,66	7,82 ± 0,13	78,78 ± 0,02	13,41 ± 0,13
03/01/2023 (A4)	46,47 ± 1,81	5,81 ± 0,22	82,58 ± 0,18	11,61 ± 0,38
03/02/2023 (A5)	49,82 ± 1,24	7,36 ± 1,69	79,67 ± 0,11	12,97 ± 1,12
09/02/2023 (A6)	49,72 ± 2,78	6,95 ± 0,22	77,43 ± 0,22	15,62 ± 0,48

*Base seca; ** Base Úmida

Fonte: Autor (2023).

Na amostra A4, o valor de umidade se encontrava abaixo da faixa recomendada, o que pode levar a um maior acúmulo de resíduos na grelha da caldeira e aumentar a formação de detritos nas superfícies de aquecimento. Essa condição contínua de umidade abaixo do ideal pode resultar em danos materiais nas tubulações e na própria caldeira (CARVALHO *et al.*, 2020). Já nas amostras A1 e A3, os resultados apresentaram-se acima do ideal, o que resulta em uma queima do combustível na fornalha com um maior consumo de bagaço e menor eficiência (BARBOSA; SANTOS; OLIVEIRA, 2018). É importante destacar que os fabricantes recomendam uma faixa de umidade entre 47 e 52% para a queima eficiente na caldeira. Em relação ao estudo de Silva e Lima (2020), a maioria dos valores encontrados no presente trabalho estão dentro da faixa recomendada pelos fabricantes, com alguns valores abaixo dos apresentados por eles, que variaram de 51,38 a 52,24%.

Na realização da análise, foi observado uma diferença de percentual de até 40% entre os percentuais de umidade em partículas de diferentes diâmetros, o que evidencia que o tamanho das partículas influencia no teor de umidade (Figura 24). Na Tabela 3 encontra-se os valores das umidades de cada ponto ao longo dos meses de armazenamento. Segundo Pérez *et al.* (2018), o bagaço é composto de partículas de diferentes tamanhos médios variando em $0,788 \pm 0,03$ mm ou mais entre si, as quais podem ser visualmente identificadas. De acordo com Rainey *et al.* (2013), as partículas mais finas apresentam uma menor capacidade de retenção de água de aproximadamente 43%.

Figura 24- Partículas de bagaço presentes em cada ponto de coleta



Fonte: Autor (2023).

Tabela 3- Análise da umidade dos pontos de coleta ao longo dos meses

Amostras **(%)	Outubro/2022	Novembro/2022	Fevereiro/2023	Março/2023
Ponto 1	15,05 ± 0,45	15,15 ± 0,84	46,43 ± 1,21	-
Ponto 2	32,13 ± 0,82	47,70 ± 0,65	-	-
Ponto 3	33,98 ± 3,18	55,28 ± 1,65	-	-
Ponto 4	43,78 ± 0,63	48,47 ± 0,64	-	-
Ponto 5	48,75 ± 1,31	51,30 ± 2,10	-	-
Ponto 2.1	-	42,95 ± 15,09	76,60 ± 0,89	79,70 ± 2,43
Ponto 3.1	-	33,82 ± 3,05	34,83 ± 1,15	35,88 ± 1,44
Ponto 4.1	-	37,55 ± 0,63	79,82 ± 1,37	67,42 ± 5,64

**Base Úmida; - Não coletado

Fonte: Autor (2023).

Na Tabela 3, foram encontrados valores de umidade que variam de 15,05% ± 0,45 a 79,82% ± 1,37. Essa ampla variação de umidade pode resultar em diferentes impactos no bagaço armazenado e na eficiência térmica da queima. Em comparação com o estudo de Correia *et al.* (2020), no qual os teores de umidade variaram de 72,9% a 80,5% em diferentes pontos de coleta no pátio de estocagem de bagaço, a presente pesquisa revelou uma faixa mais abrangente. É importante notar que a umidade tende a aumentar ao longo dos meses, o que era esperado devido ao pátio estar a céu aberto e sujeito à ação da chuva. A natureza hidrofílica do bagaço também contribui para esse comportamento, visto que em dias ensolarados o teor de água diminui e, em dias chuvosos, aumenta (TEIXEIRA *et al.*, 2015).

Essa característica fica especialmente evidente no ponto 1, que não possui camadas, permitindo uma secagem mais eficiente do bagaço e resultando em menor umidade naquela região. No entanto, durante o período chuvoso, não há resistência à transferência de massa de água, o que pode influenciar no aumento da umidade. Por outro lado, o ponto 3.1 não apresentou o mesmo comportamento, mostrando apenas um leve aumento entre os meses e uma grande compactação entre as camadas. Essas diferenças podem ser observadas na comparação entre os pontos 3.1 e 2.1 na Figura 25.

Figura 25- Pontos do pátio de estocagem: Ponto 3.1 (a) e Ponto 2.1 (b)



Fonte: Autor (2023).

O ponto 3.1 apresenta pouca umidade devido à sua grande compactação. Por estar localizado de forma que a chuva não atinge lateralmente, mas apenas as camadas superiores, a água tem dificuldade de penetrar nas camadas mais profundas, resultando em menor umidade nessa região. Por outro lado, o ponto 3.1 recebe uma incidência mais direta dos raios solares durante o dia. Essa compactação ocorre devido ao peso das camadas de bagaço, que é uma característica presente em todos os pontos do pátio. No entanto, nos outros pontos, a água da chuva bate com maior frequência e consegue penetrar melhor entre as camadas, tornando o bagaço mais solto e úmido.

Tabela 4- Análises de cinzas dos pontos de coleta ao longo dos meses

Amostras * (%)	Outubro/2022	Novembro/2022	Fevereiro/2023	Março/2023
Ponto 1	6,06 ± 0,32	8,82 ± 0,51	9,18 ± 0,70	-
Ponto 2	3,51 ± 0,19	5,67 ± 0,48	-	-
Ponto 3	4,84 ± 0,30	6,70 ± 0,16	-	-
Ponto 4	2,62 ± 0,19	2,57 ± 0,01	-	-
Ponto 5	5,34 ± 0,50	8,32 ± 0,42	-	-
Ponto 2.1	-	8,38 ± 0,43	5,64 ± 0,27	6,80 ± 0,25
Ponto 3.1	-	9,48 ± 0,55	4,62 ± 0,16	3,70 ± 0,13
Ponto 4.1	-	4,46 ± 0,52	9,15 ± 0,46	5,53 ± 0,07

*Base seca; - Não coletado

Fonte: Autor (2023).

Neste estudo, os valores de cinzas atingiram até 7,82% no bagaço da esteira (Tabela 2) e 9,48% nas amostras do pátio (Tabela 4). Essa variação demonstra que o teor de impurezas minerais, como a sílica, pode variar significativamente. A presença de sílica pode ser proveniente tanto da absorção pelas raízes da cana-de-açúcar quanto da areia residual. Durante o processo de combustão do bagaço, fatores como a temperatura das caldeiras e o tempo de queima podem determinar o aparecimento das fases estruturais amorfas ou cristalinas da sílica. Além disso, as cinzas também contêm pequenas quantidades de óxidos metálicos, como o Fe_2O_3 e Al_2O_3 (MATOS *et al.*, 2021; SANTOS, 2019). Esses elementos podem influenciar nas propriedades das cinzas e, conseqüentemente, no processo de combustão e geração de energia a partir do bagaço de cana-de-açúcar.

A época da colheita, os seus procedimentos, o tipo de solo e o manejo no armazenamento também exercem influência significativa nos teores de impurezas minerais presentes no bagaço de cana-de-açúcar. Conforme indicado por Souza (2017), estudos demonstraram que a colheita manual resulta em maiores teores de impurezas minerais em comparação à colheita mecanizada, com variações de 91,06% a 56,86%. Essa diferença ocorre devido ao fato de que as impurezas tendem a aderir ao colmo da cana durante a colheita manual, especialmente após a queima, quando a superfície da cana fica mais propícia para aderência. Além disso, o procedimento de deixar a cana deitada no solo por horas após o corte e, posteriormente, carregá-la sem os devidos cuidados para as Julietas (carros apropriados para o carregamento da cana) intensifica ainda mais a aderência de impurezas.

Na literatura, o teor de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar pode variar amplamente, com estudos relatando valores entre 0,2 e 6,6% (VAMVUKA; KAKARAS, 2011) ou representado como percentagem de peso da cana, variando de 0,14 a 3,21% (MARCONDES; BUENO, 2019). O ponto que apresentou um dos maiores teores de cinzas foi o ponto 1, o que era esperado devido à movimentação da máquina colhedora (Michigan), que arrasta as impurezas inorgânicas presentes no solo e as deposita junto ao bagaço. Os pontos 2.1, 3.1 e 4.1 também tiveram valores elevados em algum momento, devido ao fato de estarem expostos às impurezas minerais carregadas pelo vento e misturadas com o bagaço, assim como, a movimentação nos pontos 3.1 e 4.1 e o bagaço descarregado na usina no ponto 2.1.

Por outro lado, o ponto 4 apresentou os menores percentuais de cinzas, o que pode ser resultado do uso constante dessa área para alimentar a caldeira. Esse uso frequente leva a uma movimentação intensa do bagaço, mas também permite a coleta de camadas que estavam protegidas anteriormente por outras camadas, reduzindo assim o acúmulo de impurezas.

Os teores de material volátil encontrados no bagaço da esteira variaram entre 77,43 e 82,58%. Esse resultado se aproximou do valor relatado por Grotto *et al.* (2021), que foi de 81,90%. Conforme esse autor, esse dado reflete o comportamento de decomposição térmica do bagaço, que favorece a ignição e apresenta uma intensa liberação de partículas voláteis. No entanto, ele também possui baixa resistência térmica, o que resulta em um tempo de queima mais curto.

Durante o processo de pirólise, que ocorre entre 500 °C e 800 °C, a água presente na biomassa é vaporizada, e há transferência de calor, iniciando reações primárias em temperaturas mais elevadas com a liberação de compostos voláteis. O fluxo desses compostos leva à condensação de diferentes partes da biomassa, com a hemicelulose sendo principalmente transformada em voláteis (GONÇALVES, 2016; TEMPESTA, 2022). Os valores de material volátil nos pontos de coleta, conforme apresentados na Tabela 5, variaram de 71,78% a 80,82%. Esses resultados são bastante semelhantes aos obtidos no trabalho de Correia *et al.* (2020), que relatou valores de 61,39% a 89% para o teor de material volátil em diferentes pontos de coleta no pátio de estocagem de bagaço.

Tabela 5- Análise de materiais voláteis dos pontos de coleta ao longo dos meses

Amostras *(%)	Outubro/2022	Novembro/2022	Fevereiro/2023	Março/2023
Ponto 1	76,82 ± 0,28	71,78 ± 0,02	75,20 ± 0,25	-
Ponto 2	79,26 ± 0,24	73,80 ± 0,97	-	-
Ponto 3	76,78 ± 0,52	75,99 ± 2,14	-	-
Ponto 4	78,64 ± 0,68	80,82 ± 0,28	-	-
Ponto 5	79,31 ± 0,34	74,33 ± 0,08	-	-
Ponto 2.1	-	75,76 ± 0,57	78,73 ± 0,31	76,73 ± 0,44
Ponto 3.1	-	79,17 ± 0,06	80,34 ± 0,10	80,45 ± 0,26
Ponto 4.1	-	78,30 ± 0,54	76,77 ± 0,22	76,46 ± 0,08

*Base Seca

Fonte: Autor (2023).

O teor de carbono fixo apresentou valores nos pontos de coleta entre 11,34 e 20,23% em massa na Tabela 5, e uma variação menor que na Tabela 2 com o bagaço da esteira de 11,61 a 15,62%, a qual é aproximada a encontrada por Nunes *et al.*, (2017) de 12,04 a 16,4% e Santos (2020), 14,95%. Contudo, Grotto *et al.* (2021) encontrou em seu trabalho uma

variação ainda maior de 10,42 a 38,19%. Esses valores acabam sendo bem diversificados, sofrendo influência do percentual de material volátil e das cinzas.

Tabela 6- Análise de carbono fixo dos pontos de coleta ao longo dos meses

Amostras * (%)	Outubro/2022	Novembro/2022	Fevereiro/2023	Março/2023
Ponto 1	17,12 ± 0,47	19,40 ± 0,06	15,61 ± 0,34	-
Ponto 2	17,23 ± 0,30	20,23 ± 1,03	-	-
Ponto 3	18,38 ± 0,57	17,31 ± 2,15	-	-
Ponto 4	18,74 ± 0,47	16,61 ± 0,27	-	-
Ponto 5	15,35 ± 0,8	17,35 ± 0,33	-	-
Ponto 2.1	-	15,86 ± 0,07	15,63 ± 0,46	16,47 ± 0,28
Ponto 3.1	-	11,34 ± 0,50	15,04 ± 0,00	15,85 ± 0,13
Ponto 4.1	-	17,24 ± 0,59	14,09 ± 0,64	18,02 ± 0,15

*Base Seca

Fonte: Autor (2023).

Sabe-se que quanto maior o teor de carbono fixo, maior será o índice de combustão, visto que o carbono é o principal elemento combustível com o hidrogênio e enxofre (CORREIA *et al.*, 2020). Os valores encontrados de carbono fixo para o bagaço da cana-de-açúcar são adequados para geração de energia promovendo a estabilidade e resistência térmica do combustível (GRUTA *et al.*, 2020; SANTOS, 2020).

5.3 Poder calorífico Superior

O poder calorífico superior do bagaço da esteira variou, sendo a amostra A1 apresentando o maior valor com $19,37 \pm 1,98 \text{ MJ.kg}^{-1}$ e a amostra A4 o menor com $17,46 \pm 0,19 \text{ MJ.kg}^{-1}$. Esses resultados são consequência, respectivamente, de um menor teor de cinzas e um maior teor de carbono fixo, mantendo um teor de materiais voláteis aproximado. É importante destacar que os valores apresentados na Tabela 7 são superiores aos encontrados por Girão (2016), que foi de $16,87 \text{ MJ.kg}^{-1}$, e são bem similares aos resultados obtidos por Lizcano (2015), que teve uma média de $18,16 \text{ MJ.kg}^{-1}$.

Notou-se que a cada mês, houve variações no poder calorífico, exceto nos meses de janeiro e fevereiro de 2023, em que os valores se mantiveram próximos. Essa estabilidade

pode estar relacionada aos resultados das análises imediatas (Tabela 2), que também mostraram valores consistentes nesses meses.

Tabela 7- Poder calorífico superior do bagaço da esteira ao longo dos meses

Amostras*	Poder calorífico (MJ.kg ⁻¹)
10/10/2022 (A1)	19,37 ± 1,98
24/10/2022 (A2)	18,52 ± 0,69
21/11/2022 (A3)	18,29 ± 0,04
03/01/2023 (A4)	17,46 ± 0,19
03/02/2023 (A5)	17,47 ± 0,24
09/02/2023 (A6)	17,92 ± 0,10

*Base Seca

Fonte: Autor (2023).

Na Tabela 8, o poder calorífico superior obtido durante os pontos de coleta ao longo dos meses é apresentado com uma variação de 17,50 ± 0,33 a 19,62 ± 0,73 MJ.kg⁻¹.

Segundo Santos (2011), foi apresentado um poder calorífico de 12,68 MJ.kg⁻¹ no pátio, valor significativamente inferior ao encontrado no presente trabalho. Por sua vez, os resultados obtidos por Correia *et al.* (2020), que variaram de 17,55 a 23,07 MJ.kg⁻¹ foram mais semelhantes.

Tabela 8- Poder calorífico superior do bagaço nos pontos de coleta ao longo dos meses

Amostras * (MJ.kg ⁻¹)	Outubro/2022	Novembro/2022	Fevereiro/2023	Março/2023
Ponto 1	18,26 ± 0,62	17,50 ± 0,33	18,47 ± 0,22	-
Ponto 2	19,62 ± 0,73	18,17 ± 0,37	-	-
Ponto 3	18,26 ± 0,80	17,62 ± 0,38	-	-
Ponto 4	18,48 ± 0,09	18,65 ± 0,60	-	-
Ponto 5	19,16 ± 0,29	17,75 ± 0,17	-	-
Ponto 2.1	-	18,48 ± 0,19	18,27 ± 0,50	17,85 ± 0,06
Ponto 3.1	-	18,76 ± 0,37	18,57 ± 0,20	18,52 ± 0,22
Ponto 4.1	-	18,01 ± 0,25	18,53 ± 0,33	18,25 ± 0,27

*Base Seca

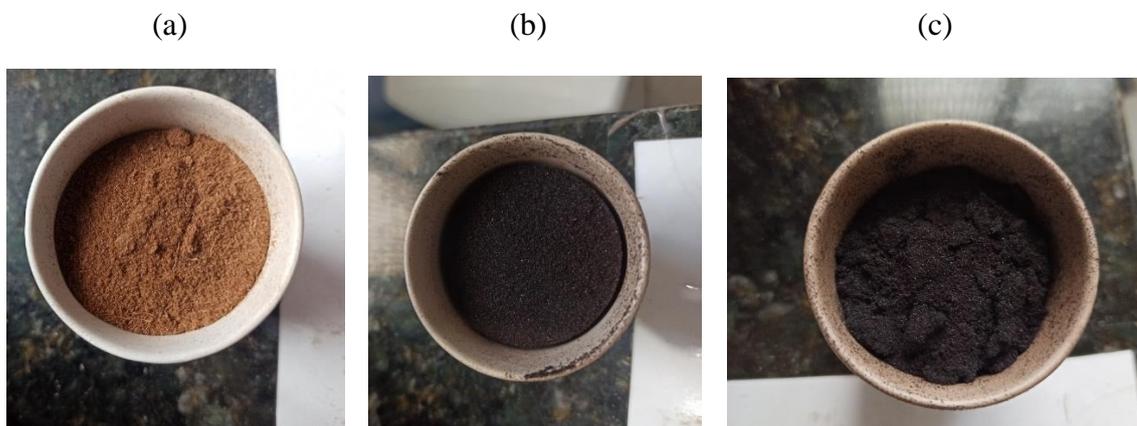
Fonte: Autor (2023).

Por ser uma mistura de bagaço, influenciado inicialmente pelo bagaço da esteira, ele sofreu influências climáticas e do ambiente de armazenamento, foi esperado uma oscilação no poder calorífico superior, porém não houve uma oscilação expressiva. Todavia, o ponto 3.1 apresentou a menor oscilação entre os meses, o que foi decorrência dos resultados das análises imediatas ao longo dos meses e da maneira seca e compacta que ele ficou. Isso demonstra o quão é importante a qualidade e as características do bagaço que é gerado e levado para estocagem. Porque de base daqueles parâmetros obtidos vão havendo modificações e misturas com outros bagaços gerando uma melhora ou piora daquela matéria-prima.

5.4 Torrefação

Na torrefação o principal produto é a fase sólida que possui similaridade ao processo de pirólise devido a estrutura química da biomassa ser alterada (ARAUJO, 2018). Conforme as Figuras 26, percebe-se que visualmente a coloração da massa é diferente, contudo, a diferença maior está presente no rendimento dessa massa e rendimento energético.

Figura 26- Torrefação a 200 °C (a); Torrefação a 250 °C (b); Torrefação a 300 °C (c)

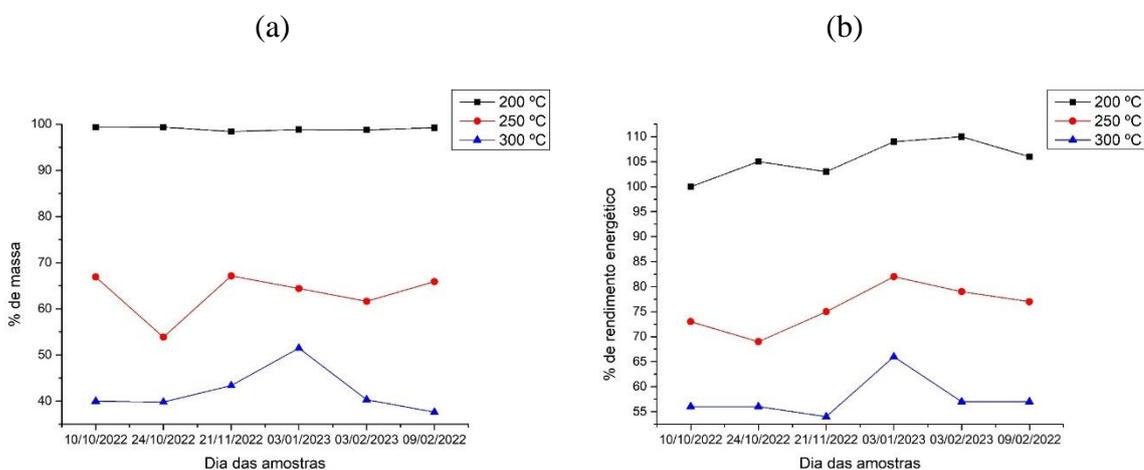


Fonte: Autor (2023).

A análise da perda de massa no trabalho apresentou variações significativas nas diferentes temperaturas: a 200 °C, a perda de massa variou de 98,42 a 99,37%; a 250 °C, de 53,85 a 67,12%; e a 300 °C, de 37,59 a 51,48% (Figura 27). Esses resultados são consistentes com os estudos de Conag *et al.* (2019), que relatam que o aumento da temperatura na torrefação causa uma redução no material volátil presente no bagaço, levando à perda de massa.

Esses achados também corroboram com as conclusões de Brojollal e Surroop (2022), que obtiveram um rendimento de 70,40% a 250 °C e 51,20% a 300 °C em sua pesquisa. É importante mencionar que o tamanho das partículas da matéria-prima torrefada pode influenciar os resultados, como apontado pelos mesmos autores. Partículas maiores podem gerar temperaturas internas mais altas devido a taxas mais elevadas de transferência de calor, o que resulta em uma quebra mais completa da biomassa. Em contrapartida, partículas menores podem ter taxas de transferência de calor reduzidas, o que resulta em temperaturas internas mais baixas (NHUCHHEN; BASU; ACHARYA, 2014).

Figura 27- Rendimentos percentuais de massa nas temperaturas de 200, 250 e 300 °C (a); Rendimentos percentuais de energia nas temperaturas de 200, 250 e 300 °C (b)



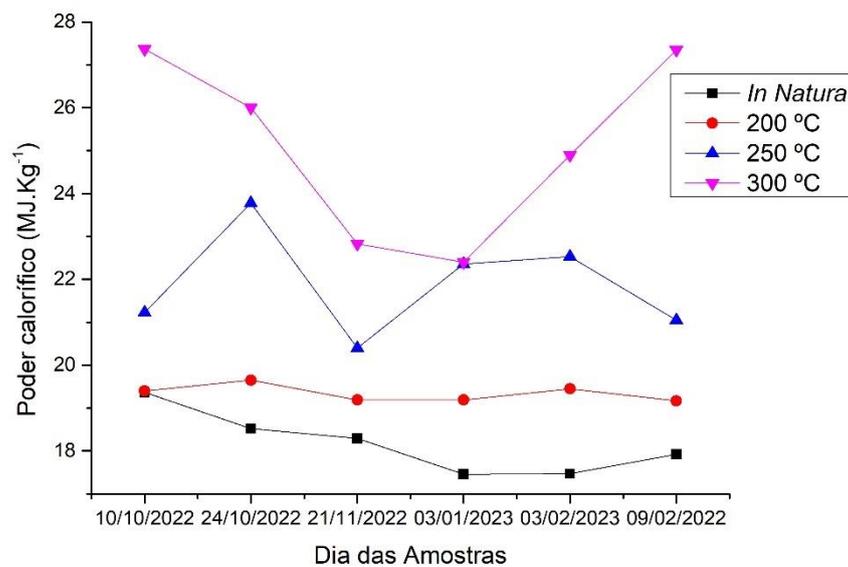
Fonte: Autor (2023).

A análise da Figura 27 revela uma redução no rendimento energético do bagaço torrado à medida que a severidade da torrefação aumenta. Esse fenômeno ocorre devido à decomposição da hemicelulose em altas temperaturas, levando a uma maior perda de massa. No presente estudo, foram obtidos rendimentos energéticos variando de 54 a 66% na torrefação a 300 °C, indicando uma severidade elevada nesse processo. Por outro lado, na torrefação a 200 °C, foram alcançados rendimentos mais elevados, variando de 110 a 109%. Esses resultados foram fortemente influenciados pelo alto rendimento de massa obtido nesse processo, que variou de 98,42 a 99,37%, bem como pela realização da torrefação com a base seca.

Comparando com os estudos de Brojollal e Surroop (2022), encontramos valores similares de rendimento energético para o bagaço de cana torrado. Na literatura, os rendimentos variam de 96,64% para a torrefação T225/60 a 66,92% para a torrefação

T300/60. Esses resultados reforçam a importância de controlar a severidade da torrefação para otimizar o rendimento energético e obter bioprodutos de alta qualidade a partir do bagaço de cana-de-açúcar. Além disso, essas informações são valiosas para o desenvolvimento de estratégias de utilização sustentável dos resíduos da indústria sucroalcooleira. Na Figura 28, os maiores poderes caloríficos foram com a torrefação a 300 °C, obtendo 27,37 e 27,35 MJ.kg⁻¹, os quais representou um aumento de poder calorífico de 41,30 e 52,62%, respectivamente, demonstrando que é possível obter um aumento maior que 30% declarado por Granados *et al.* (2017). Melles (2018), conseguiu um aumento de 81% no poder calorífico utilizando uma torrefação de 300 °C a 60 minutos.

Figura 28- Poder calorífico do bagaço *in natura* e após torrefação nas temperaturas de 200, 250 e 300 °C



Fonte: Autor (2023).

Após as análises, os bagaços torrefados foram misturados de acordo, com o grau de torrefação e acondicionados em recipientes modificados para que eles ficassem na usina durante 3 meses estocados (Figura 29).

Figura 29- Potes de bagaço torrefados no pátio da usina



Da esquerda para a direita: bagaço torrefado a 200 °C; a 250 °C; a 300 °C.

Fonte: Autor (2023).

Na Tabela 9 é possível observar os resultados de umidade e poder calorífico obtidos em cada mês e seus respectivos comportamentos na estocagem.

Tabela 9- Percentual de umidade e poder calorífico dos bagaços torrefados antes e durante os 3 meses de estocagem na usina

Umidade (%)			
Amostras **	Torrefados a 200 °C	Torrefados a 250 °C	Torrefados a 300 °C
Antes da estocagem	1,39 ± 0,05	1,21 ± 0,25	3,58 ± 0,10
Após 1 mês	50,60 ± 0,20	25,30 ± 0,35	34,50 ± 1,25
Após 2 meses	14,15 ± 0,07	-	-
Após 3 meses	-	-	-

Poder calorífico (MJ.kg ⁻¹)			
Amostras **	Torrefados a 200 °C	Torrefados a 250 °C	Torrefados a 300 °C
Antes da estocagem	19,34 ± 0,17	21,89 ± 1,12	24,03 ± 1,46
Após 1 mês	8,21 ± 0,89	17,92 ± 0,89	12,12 ± 0,93
Após 2 meses	16,90 ± 0,33	20,65 ± 1,66	21,73 ± 0,78
Após 3 meses	11,76 ± 2,60	13,83 ± 2,03	15,00 ± 0,89

** Base Úmida; - Não foi possível realizar

Fonte: Autor (2023).

Os resultados iniciais deste estudo revelaram a presença de um percentual de umidade no bagaço antes de ser estocado, o que pode ser atribuído à umidade absorvida do ambiente

no momento da análise, quando o recipiente foi aberto para a realização das medições detalhadas nos itens anteriores. No entanto, é interessante notar que outros estudos, como o de Melles (2018), também encontraram teores de umidade no bagaço torrefado a 200 °C e 300 °C por 1 hora, obtendo valores de 2,65% e 2,26%, respectivamente. Além disso, a pesquisa conduzida por Arantes (2014) demonstrou que o aumento do tempo de torrefação pode levar a uma redução na absorção de umidade pelo bagaço. Ao utilizar um tempo de torrefação de 60 minutos, obteve-se uma redução de 22% na absorção de umidade e uma diminuição de 24% no poder calorífico.

A presença de umidade também foi observada no bagaço torrefado armazenado, apesar de se esperar uma redução na absorção de umidade. Essa ocorrência pode ser atribuída a dois fatores principais. Primeiro, o recipiente utilizado para o armazenamento não permite que o vapor de água saia livremente, resultando em condensação na tampa do recipiente. Além disso, as partículas do material são pequenas, o que possibilita uma maior área de superfície por partícula, tornando-as mais suscetíveis à absorção de umidade do ambiente circundante. Esse fator foi ainda mais acentuado pelo volume de precipitação em Pedras de Fogo no mês de abril, que atingiu 189,2 mm (AES A, 2023).

Como resultado, as amostras coletadas no primeiro mês de armazenamento apresentaram uma redução no poder calorífico, com destaque para as amostras torrefadas a 200 °C e 300 °C, que apresentaram reduções de 57,55% e 49,56%, respectivamente. Essa diminuição no poder calorífico não se deve apenas à umidade, mas também ao acúmulo de material inorgânico que ficou retido nos cadinhos durante o processo de torrefação. Esse material constitui o pátio da usina, com as fortes chuvas, os potes de armazenamento dos torrefados foram arrastados pelo ambiente, devido ao seu pouco peso e ventos fortes. Nesse momento, o material inorgânico entrou nos potes de armazenamento pelos buracos presentes nas tampas. O torrefado de 250 °C, não tinha nenhum material inorgânico, e no pátio da usina, foi o único que não foi arrastado pelos ventos, e conseguiu absorver menos umidade, tendo como consequência uma perda de massa de apenas 18,13%.

No segundo mês não foi possível obter a umidade das amostras dos torrefados de 250 e 300 °C, assim como no terceiro mês até com o de 200 °C como mostrado na Tabela 10. Isso ocorreu porque ao fazer o procedimento de umidade estava subindo um cheiro forte decorrente de uma possível volatilização de materiais, o que causaria um resultado incorreto, já que o sensor do equipamento mede o que é volatilizado, e a amostra de 300 °C quase entrou em combustão. Além disso, houve um aumento no poder calorífico superior das 3 amostras

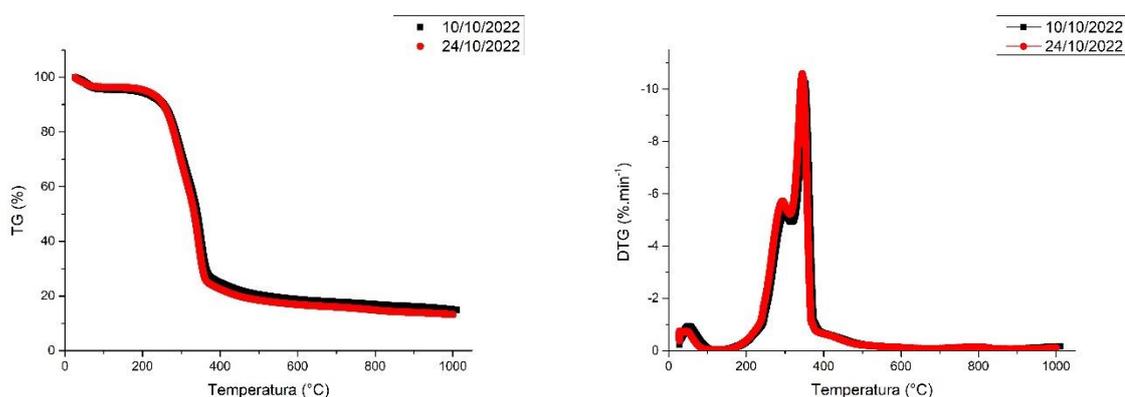
torrefadas, isso devido as baixas precipitações durante o mês de maio (14,3 mm) como registrado pela AESA (2023). O aumento mais expressivo foi o de 200 °C com um aumento de quase 106% seguido do de 300 °C com 79,29% e 250 °C com 15,23%. Em junho as precipitações chegaram a 137,2 mm no município (AESA, 2023), em consequência, o PCS das amostras reduziu em 30,41% no de 200 °C, 33,03% no de 250 °C e 30,97% no de 300 °C.

5.5 Análise Termogravimétrica

Na Figura 30 estão apresentadas as análises de TG e DTG do bagaço da esteira do dia 10/10/2022 em comparação com o bagaço do ponto 2 do dia 24/10/2022 no qual a biomassa do mês estava sendo colocado. Percebe-se que as curvas de TG e DTG são bem parecidas com pequenas diferenças nas temperaturas e perdas de massa ressaltadas na Tabela 10.

Na literatura a primeira queda na porcentagem de massa é observada até a temperatura de 110°C e está relacionada com a saída de parte dos materiais voláteis e umidade (MORAIS *et al.*, 2017; GROTTTO *et al.*, 2021). A segunda queda de massa começa com a hemicelulose de 190 a 300 °C, com taxa máxima de perda de massa a 250 °C e a celulose se decompõe na faixa de temperatura de 250 a 350 °C, com taxa máxima de perda de massa a 330 °C. A terceira queda de massa entre 330 e 600°C na qual a lignina tem taxa máxima de perda de massa a 430 °C (MORAIS *et al.*, 2017; GROTTTO *et al.*, 2021; SANTOS *et al.*, 2011).

Figura 30- TG e DTG do bagaço do dia 10/10/2022 e 24/10/2022



Fonte: Autor (2023).

Tabela 10- Diferenças de temperatura e perda de massa das DTG do dia 10/10/2022 e 24/10/2022

Temperatura (°C)		
Amostras*	10/10/2022 (A1)	24/10/2022 (A2)
1° Pico	55,83	50,41
2° Pico	297,38	303,79
3° Pico	350,13	354,63
4° Pico	419,12	415,04

Perda de Massa (%)		
Amostras*	10/10/2022 (A1)	24/10/2022 (A2)
1° Pico	4	3
2° Pico	38	39
3° Pico	25	28
4° Pico	5	4

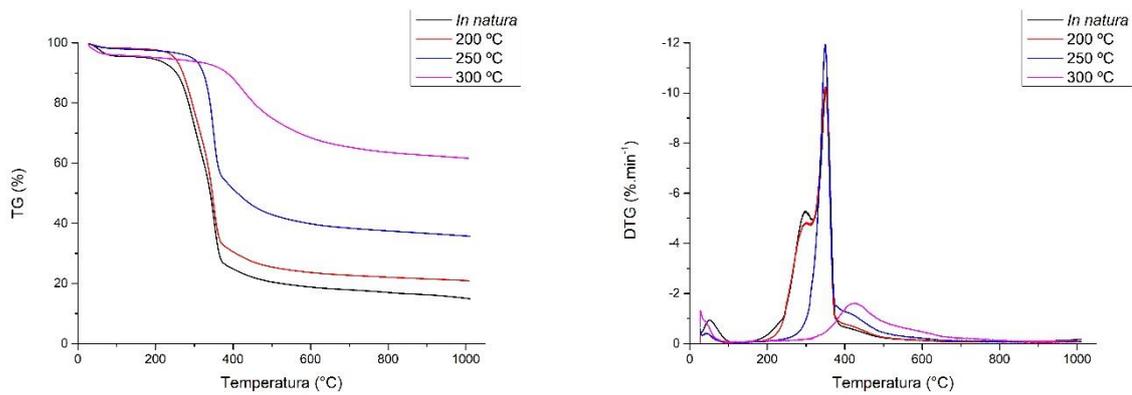
*Base Seca

Fonte: Autor (2023).

Nos resultados obtidos, a termogravimetria (TG) revelou a variação do percentual de massa do BCA (bagaço de cana torrado) com o aumento da temperatura, tanto para o bagaço da esteira quanto para o ponto 2. Nesses casos, observou-se que o percentual de redução de massa cresceu acentuadamente após atingir as temperaturas de 150°C e 200°C, estabilizando-se acima de 600°C. Já a curva DTG, que representa a variação de massa por minuto, revelou que as amostras A1 e A2 apresentaram quatro picos de redução de massa distintos: o primeiro foi com 55,83 e 50,41 °C, dando a entender que tinham um percentual de umidade aproximado entre os bagaços, o qual compreendia uma faixa de temperatura de 30 até entorno de 95 °C com perdas de massa de 4 e 3%. Perdas de massa parecidas foi no segundo ponto também com 38 e 39%, com pico em 297,38 e 303,79 °C compreendendo toda a hemicelulose por causa da sua baixa estabilidade térmica, volatilizando facilmente e uma parte da celulose (MELLES, 2018). A qual tem a sua maior decomposição no terceiro pico que foi em 350,13 e 354,63 °C, é visível na Figura 30 que ele é maior no A2 por apresentar uma perda de massa de 29%. A lignina, a qual tem a sua perda máxima com o quarto pico que foi com 419,12 e 415,04 °C com uma perda de massa de 5 e 4%. O polímero necessita de uma maior quantidade de energia para quebrar suas ligações.

No trabalho de Belini (2018), a DTG apresentou 4 pontos de perda de massa, de maneira bem similar aos resultados encontrados, porém com valores diferentes. O primeiro pico foi com 73 °C, o segundo com 330 °C, o terceiro com 383 °C e o quarto com 444 °C, com perdas de massa de 2, 41, 30 e 9%, respectivamente. O A1 foi torrefado e a TG e DTG apresentou diferenças entre o BCA *in natura* e entre as diferentes temperaturas de torrefações (Tabela 11) demonstrando que ocorrem mudanças na biomassa torrefada (Figura 31).

Figura 31- TG e DTG do bagaço do dia 10/10/2022 *in natura* e torrefado a 200, 250 e 300 °C



Fonte: Autor (2023).

Tabela 11- Picos de temperatura e perda de massa no bagaço do dia 10/10/2022 *in natura* e torrefado a 200, 250 e 300 °C

Temperatura (°C)				
Amostras	BG do dia 10/10/2022 (A1)	Torrefado a 200 °C	Torrefado a 250 °C	Torrefado a 300 °C
1° Pico	55,83	42,26	47,65	31,90
2° Pico	297,38	299,14	349,53	427,42
3° Pico	350,13	350,20	402,54	598,60
4° Pico	419,12	427,3	597,25	-

Perda de Massa (%)				
Amostras	BG do dia 10/10/2022 (A1)	Torrefado a 200 °C	Torrefado a 250 °C	Torrefado a 300 °C
1° Pico	4	1,53	1,33	3,93
2° Pico	38	25,07	44,37	24,17
3° Pico	25	38,84	12,22	10,16
4° Pico	5	8,75	4,27	-

Fonte: Autor (2023).

Pode-se observar na Figura 31 que o torreficado a 200 °C apresenta um comportamento similar ao bagaço *in natura* (Tabela 11). Todavia, ocorre uma diminuição na perda de massa dos primeiros picos em comparação com o BCA inicial devido a uma quantidade de materiais voláteis e hemicelulose já terem sido eliminados durante o processo de torrefação (MELLES, 2018).

Na Figura 31 existem mudanças nos picos de temperatura e perda de massa com o aumento de 50 °C na torrefação. O primeiro é com 47,65 °C, o segundo já é com 349,53 °C, o que é um indicativo que ainda existe a presença de uma fração de celulose com a maior perda de massa de 44,37%. O terceiro é com 402,54 °C e o quarto com 597,25% correspondendo a fração de lignina, pois não houve o pico de hemicelulose, de 190 a 300 °C, significando que ela foi degradada termicamente com a torrefação (MORAIS *et al.*, 2017; GROTTTO *et al.*, 2021;).

Contudo, o bagaço torrefado a 300 °C apresenta um pico a menos de perda de massa e maiores temperaturas a cada ponto, além de uma redução no valor do DTG significando uma total degradação da hemicelulose, e um percentual grande de celulose, tendo seu segundo pico

com 427,42 °C. A fração de lignina sendo torrefado, é maior na DTG de 300 °C quando comparado a do bagaço *in natura* chegando a 10,16% de perda de massa. Esse BCA torrefado é composto de uma fração de lignina e uma fração mínima de celulose e resíduo necessitando de temperaturas mais elevadas para a sua queima. De todos os bagaços torrefados, ele foi o que apresentou maior perda de massa no primeiro pico com 3,93%, resultado que está na média da umidade encontrada nos torrefados de 300 °C antes da estocagem (Tabela 9).

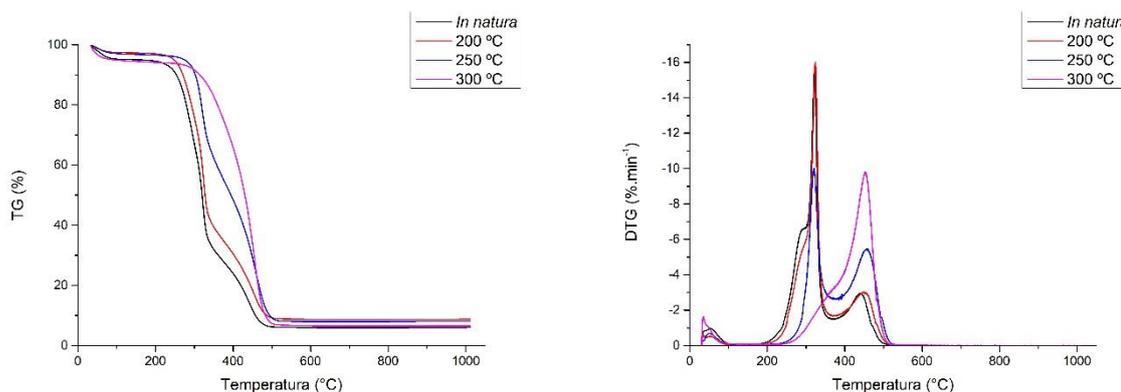
À medida que o bagaço de cana foi sendo torrefado em temperaturas mais altas, observou-se um aumento no residual final. Enquanto o bagaço *in natura* apresentou um residual de 14,62%, nos bagaços torrefados a 200, 250 e 300 °C, o residual foi de 22,91%, 35,71% e 61,61%, respectivamente. Esse resultado do bagaço *in natura* está de acordo com estudos anteriores, como o de Grotto *et al.* (2021), que encontrou um residual de 20%, e o de Araújo (2021), que obteve 16% de massa residual.

Conforme mencionado por Rambo *et al.* (2015), o residual é composto por carbono fixo e cinzas, sendo que a parte representativa do percentual pode entrar em combustão e a parte menor é composta pelas cinzas. Esse comportamento está diretamente relacionado ao aumento da temperatura de pirólise, resultando em um maior teor de carbono fixo e uma redução do teor de voláteis, como também observado nos estudos de Marques *et al.* (2022). As cinzas são produtos da combustão dos componentes orgânicos e da oxidação dos materiais inorgânicos presentes na amostra. Esse comportamento se mostra proporcional ao aumento da temperatura de pirólise, destacando a presença de material inorgânico na amostra. Estudos como os de Pires (2017) e Jeong *et al.* (2016) também evidenciaram a redução do rendimento gravimétrico com o acréscimo da temperatura de pirólise.

5.6 Comportamento da Combustão

Na Figura 32 está o comportamento da combustão do bagaço da esteira *in natura* do dia 10/10/2022 (A1) e dos seus bagaços torrefados a 200, 250 e 300 °C, o qual tem relação com a liberação de umidade e material volátil, seguida de oxidação dos materiais voláteis e do carbono fixo (LIRA; SILVA, 2015).

Figura 32- Comportamento da combustão do bagaço *in natura* do dia 10/10/2022 e dos seus bagaços torrefados a 200, 250 e 300 °C



Fonte: Autor (2023).

As curvas TG da Figura 32 revelam que ocorreu uma extensa oxidação do material, restando um percentual de cinzas entorno de 7% no bagaço *in natura* do dia 10/10/2022, 8,2% no bagaço torrefado a 200 e 250 °C e 6% no torrefado a 300 °C. Além disso, nota-se que nessa atmosfera os eventos foram mais intensos, principalmente nas temperaturas mais altas.

Através das curvas DTG observam-se pontos principais de perda de massa em ambas as amostras. O primeiro sempre abaixo de 100 °C, representa a perda de umidade das amostras, no qual a maior perda foi entorno de 5,5% tanto no bagaço *in natura* como no bagaço torrefado a 300 °C. O segundo evento está relacionado à decomposição da hemicelulose e celulose, no qual a hemicelulose teve seu pico 268,58 °C e a celulose com 321,78 °C no bagaço *in natura*. Essa temperatura mudou pouco na torrefação de 200 °C, foi para 283,89 e 323,58 °C, demonstrando assim, que a diferença dos picos iniciais na combustão, entre as amostras, foi pequena, tendo uma perda de massa, respectivamente, de 23 e 25%; 24 e 27%. A lignina, por outro lado, teve o pico em 443,51 e 452,93 °C, com as perdas de massa de 24 e 32% nos bagaços *in natura* e torrefado a 200 °C, os quais apresentaram uma estabilidade térmica após 500 °C, onde não ocorreu mais nenhuma reação nas amostras.

O comportamento dos bagaços torrefados de 250 e 300 °C foi diferente, pois ocorreu uma mudança nos estágios de decomposição dos materiais causados pelo próprio pré-tratamento (RIBEIRO, 2017). O segundo pico com 315,69 °C e um pequeno “joelho” com 340,70 °C, demonstrando a decomposição total da hemicelulose e o começo da celulose. O terceiro pico foi com 453,65 e 453,89 °C representando a degradação da lignina com perda de massa de 45 e 58% com uma estabilidade térmica após os 510 °C.

No estudo de Araújo (2021) em atmosfera oxidante, foi observado um comportamento diferente com distintos números de picos referentes às perdas de massa. A oxidação foi mais reativa e resultou, na maioria dos casos, em picos de temperaturas mais baixas, o que está em consonância com o estudo de Ribeiro (2017). Contudo, alguns pontos de análise apresentaram resultados convergentes entre as duas atmosferas. Por exemplo, o primeiro pico no bagaço torrefado a 300 °C mostrou uma diferença sutil em relação ao primeiro pico na atmosfera oxidante, que pode ser atribuída à umidade presente nas partículas analisadas. Em contrapartida, no quarto pico tanto no bagaço *in natura* quanto no bagaço torrefado a 200 °C, houve o pico de temperatura em um grau maior na atmosfera oxidante, indicando uma decomposição menos intensa da lignina nesses materiais.

6 CONCLUSÃO

O pátio de estocagem de bagaço passa por mudanças ao longo da safra e essas mudanças são essenciais para compreender a dinâmica de armazenamento do bagaço e auxiliar na implementação de práticas de manejo adequadas, garantindo a preservação da qualidade do material e a otimização da eficiência na geração de bioenergia na usina sucroalcooleira.

Entre todos os pontos de coleta, o ponto 3.1 apresentou a menor oscilação de PCS com $18,76 \text{ MJ.kg}^{-1}$ em novembro de 2022 e $18,52 \text{ MJ.kg}^{-1}$ em março de 2023, o que é consequência da compactação e baixa umidade presente no bagaço nesse ponto. Esse resultado é um dado importante para um melhor gerenciamento do pátio na busca por uma estabilidade ao longo dos meses, possibilitando uma viabilidade operacional a ser trabalhada mediante a diferentes níveis de compactação no armazenamento.

O bagaço, por ser hidrofílico, aumentou seu percentual de umidade ao longo dos meses nos demais pontos devido ao armazenamento ao ar livre. Além disso, o teor de cinzas oscilou em cada ponto de coleta destacando a importância de considerar fatores como a localização dos pontos de amostragem, a movimentação do bagaço e a exposição às impurezas minerais ao interpretar os resultados das análises.

O percentual de material volátil também sofreu oscilações, mas em menor intensidade, indicando uma degradação limitada, a priori, da biomassa na camada após 30 cm de profundidade. Por outro lado, o carbono fixo teve maiores oscilações, uma vez que depende das cinzas e do material volátil.

A torrefação do bagaço aumentou o PCS em até 52,62% quando utilizada uma temperatura de 300 °C. No entanto, reduziu o poder calorífico superior em 49,56% após o armazenamento, devido a presença de material inorgânico e uma tendência a absorção de umidade. Os resultados sugerem que a torrefação a 250 °C teve uma absorção de umidade mais eficiente, embora ainda tenha apresentado uma porcentagem de água de $25,30\% \pm 0,35$.

As análises termogravimétricas entre as amostras do pátio e do bagaço da esteira foram semelhantes, com maiores diferenças entre os bagaços torrefados à medida que a temperatura aumentava. Foi possível observar a degradação térmica da hemicelulose, celulose e lignina, sendo que a degradação da hemicelulose foi completa, primeiramente, com bagaço torrefado a 250 °C e a celulose sofreu grande degradação a 300 °C, com uma maior fração de lignina.

Na análise de combustão, o bagaço torrefado a 200 °C apresentou uma combustão semelhante ao bagaço *in natura*, mas diferente dos bagaços torrefados a 250 e 300 °C, que exibiram segundo e terceiro picos com intensa perda de massa devido às mudanças causadas pelo pré-tratamento do bagaço nas suas propriedades físico-químicas.

Portanto, este trabalho apresentou resultados consistentes com a literatura, além de fornecer dados importantes sobre o comportamento do bagaço *in natura* e torrefado durante o armazenamento, degradação e combustão.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar novos acompanhamentos sobre o comportamento do bagaço no pátio de armazenamento com uma maior profundidade de coleta;
- Estudar a cinética da combustão entre biomassa *in natura* e torrefada;
- Estudar a estocagem do bagaço torrefado com diferentes tamanhos, tempos e temperaturas para comparações.

8 REFERÊNCIAS

- AESA. **Precipitação Máxima dos Municípios**, 2023. Disponível em: < <http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/meteorologia-chuvas/?formdate=2023-05-03&produto=municipio&periodo=mensal> >. Acesso em: 31/05/2023.
- ABDELAZIZ, O. Y; BRINK, D. P; PROTHMANN, J; RAVI, K; SUN, M; HIDALGO, J. G; SANDAHL, M; HULTEBERG, C. P; TURNER, C; LIDEN, G; GRAUSLUND, M. F. G. **Biological valorization of low molecular weight lignin**. *Biotechnology Advances*, v. 34, ed. 8, p. 1318-1346, 2016.
- ACHARYA, S; LIYANAGE, S; PARAJULI, P; RUMI, S. S; SHAMSHINA, J. L; ABIDI, N. **Utilization of Cellulose to Its Full Potential: A Review on Cellulose Dissolution, Regeneration, and Applications**. *Polymers*, v. 13, ed. 24, 2021.
- ADELEKE, A. A; ODUSOTE, J. K; IKUBANNI, P. P; LASODE, O. A; MALATHI, M; PASWAN, D. **Essential basics on biomass torrefaction, densification and utilization**. *International Journal of Energy Research*, v. 45, ed. 2, p. 1375-1395, 2020.
- AGUIAR, A. N. **Estudo analisou potencial de biomassa da cana-de-açúcar**. 2015. Disponível em: <http://www4.esalq.usp.br/banco-de-noticias/estudo-analisou-potencial-de-biomassada-cana-de-açúcar>. Acesso em: 05/12/2022.
- ALOKIKA, A; KUMAR, V; KUMAR, V; SINGH, B. **Cellulosic and hemicellulosic fractions of sugarcane bagasse: Potential, challenges and future perspective**. *International Journal of Biological Macromolecules*, v. 169, p. 564-582, 2021.
- ALÓ, L. L; KONISHI, P. A; BELINI, G. B; SILVA, J. P; MARTINS, M. P; NAKASHIMA, G. T; CARASCHI, J. C; YAMAJI, F. M. **Briquetes de Bagaço de Cana-de-Açúcar e Pó de Lixa de Eucalyptus spp: Caracterização e Equilíbrio Higroscópico**. *Virtual Química*, v. 9, p. 774-785, 2017.
- AMARAL, A. L; SANTOS, J. M; BARBOSA, G. V. S. **Denominação de Cultivares de Cana-de-Açúcar como Suporte à Documentação e Utilização do Germoplasma Conservado**, 2015. Disponível em: < <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1042905/1/Doc196.pdf> >. Acesso em: 18/09/2022.
- ANI, P. C; NZEREOGU, P. U; AGBOGU, A. C; EZEMA, F. I; NWANYA, A. C. **Cellulose from waste materials for electrochemical energy storage applications: A review**. *Applied Surface Science Advances*, v. 11, 2022.
- ANUKAN, A; MAMPHWELI, S; REDDY, P; MEYER, E; OKOH, O. **Pre-processing of sugarcane bagasse for gasification in a downdraft biomass gasifier system: A comprehensive review**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 66, p. 775-801, 2016.
- ARANTES, D. C. **Bagaço de cana-de-açúcar: análise térmica e energética da biomassa**, 2014. Disponível em: < <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14971/1/BagaçoCana-de-açúcarAnálise.pdf> >. Acesso em: 31/05/2023.

ARAÚJO, D. M. **Estudo do comportamento da co-combustão da borra de café e do bagaço de cana-de-açúcar**, 2021. Tese (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa.

ARAÚJO, P. H. G. **Torrefação do bagaço de cana-de-açúcar para seu uso como combustível em reatores de gaseificação**, 2018. Disponível em: < <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/203698/000919411.pdf?sequence=1&isAllowed=y> >. Acesso em: 03/07/2023.

ARSHAD, M; AHMED, S. **Cogeneration through bagasse: A renewable strategy to meet the future energy needs**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 54, p. 732-737, 2016.

AVDIUSHCHENKO, A; ZAJAC, P. **Circular Economy Indicators as a Supporting Tool for European Regional Development Policies**. Sustainability, 2019.

BACH, Q. V; SKREIBERG, O. **Upgrading biomass fuels via wet torrefaction: A review and comparison with dry torrefaction**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 54, p. 665-677, 2016.

BARBOSA, B. H; SANTOS, C. S; OLIVEIRA, S. **Análise da eficiência energética do bagaço da cana na geração de vapor em uma usina sucroalcooleira**, 2018. Disponível em: < <https://www.proquest.com/openview/9f639fefcec973531f0e771b7856c2cf/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2035014> >. Acesso em: 25/05/2023.

BARSKOV, S; ZAPPI, M; BUCHIREDDY, P; DUFRECHE, S; GUILLORY, J; GANG, D; HERNANDEZ, R; BAJPAI, R; BAUDIER, J; COOPER, R; SHARP, R. **Torrefaction of biomass: A review of production methods for biocoal from cultured and waste lignocellulosic feedstocks**. Renewable Energy, v. 142, p. 624-642, 2019.

BASU, P. B. E. **Experimental study on fluidization of biomass, inert particles, and biomass/sand**. University Of North Texas, 2010.

BASU, P. B. E. **Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory**. London, UK: Academic Press; 2013.

BAZZO, E. **Geração de vapor**. 2 ed. Florianópolis: UFSC, 1995.

BELINI, G. B. **Termogravimetria aplicada para caracterização da biomassa**, 2018. Disponível em: < <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/9855/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20Gabriela%20Bertoni%20Belini.pdf?sequence=1&isAllowed=y> >. Acesso em: 08/06/2023.

BEN. **Balanco Energético Nacional**, 2022. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf> >. Acesso em: 30/10/2022.

BEN. **Balço Energético Nacional**, 2023. Disponível em: < https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-681/BEN_S%C3%ADntese_2023_PT.pdf >. Acesso em: 02/07/2023.

BERGMAN, P. C. A; BOERSMA, A. R; ZWART, R. W. R; KIEL, J. H. A. **Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations “BIOCOAL”**, 2005. Disponível em: < https://www.researchgate.net/profile/Robin-Zwart/publication/204978559_Torrefaction_for_Biomass_Co-Firing_in_Existing_CoalFired_Power_Stations/links/09e41511c9aaf0e1c7000000/Torrefaction-for-Biomass-Co-Firing-in-Existing-Coal-Fired-Power-Stations.pdf >. Acesso: 24/11/2022.

BEZERRA, F. S. **GESTÃO DE ESTOQUE E ARMAZENAGEM: UM ESTUDO DE CASO**, 2015. Disponível em: < https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/26808/1/2015_tcc_fshezerra.pdf >. Acesso em: 04/12/2022.

BOONMEE, N; PONGSAMANA, P. **Spontaneous Ignition of Bagasse Stockpiles in Thailand: A Fire Safety Concern**. Engineering Journal, v. 21, ed. 3, 2017.

BROJOLALL, N; SURROOP, D. **Improving fuel characteristics through torrefaction**. Energy, v. 246, 2022.

BUCKERIDGE, M. S; SOUZA, A. P; REBECCA, A; ARUNDALE, K. J; TEIXEIRA, A; LUCIA, E. **Ethanol from sugarcane in Brazil: a ‘midway’ strategy for increasing ethanol production while maximizing environmental benefits**. GCB- Bioenergy, v. 4, ed. 2, p. 119-126, 2011.

CANA ONLINE. **Tonelada de bagaco de cana chega a custar 400 reais em 2021**, 2022. Disponível em: < <http://www.canaonline.com.br/conteudo/tonelada-de-bagaco-de-cana-chega-a-custar-400-reais-em-2021.html#:~:text=23%2D03%2D2022> >. Acesso em: 10/12/2022.

CANGUSSU, N; CHAVES, P; ROCHA, W; MAIA, L. **Particleboard panels made with sugarcane bagasse wastean exploratory study**. Environmental sustainability and remediation, 2021.

CARDOSO, T. F; WATANABE, M. D.B; SOUZA, A; CHAGAS, M. F; CAVALETT, O; MORAIS, E. R; NOGUEIRA, L. A. H; LEAL, M. R. L. V; BRAUNBECK, O. A; CORTEZ, L. A. B; BONOMI, A. **A regional approach to determine economic, environmental and social impacts of different sugarcane production systems in Brazil**; Biomass and Bioenergy, n. 120, p. 9-20, 2019.

CARVALHO, A. H. S; SANTOS, C. A; FARAH, S. P. S; FARAH, A. F. **Influence of the humidity of sugar cane baggage in the energy cogeneration system**. Sitefa, 2020.

CASTRO, N. J; DANTAS, G. A. **Lições do PROINFA e do Leilão de Fontes Alternativas para a Inserção da Bioeletricidade Sucroalcooleira na Matriz Elétrica Brasileira**, 2008. Disponível em: < http://www.nuca.ie.ufrj.br/gesel/artigos/0808XX_CastroDantas_Proinf aAlternativasBioeletricidade.pdf >. Acesso em: 30/10/2022.

CAVALCANTI, E. J. C; CARVALHO, M; SILVA, D. R. S. **Energy, exergy and exergoenvironmental analyses of a sugarcane bagasse power cogeneration system.** Energy Conversion and Management, v. 222, 2020.

CHEN, W. H; HSU, H. J; KUMAR, G; BUDZIANOWSKI, W. M; ONG, H. C. **Predictions of biochar production and torrefaction performance from sugarcane bagasse using interpolation and regression analysis.** Bioresource Technology, v. 246, p. 12-19, 2017.

CHEN, W. H; KUO, P. C. **A study on torrefaction of various biomass materials and its impact on lignocellulosic structure simulated by a thermogravimetry.** Energy, v. 35, ed. 6, p. 2580-2586, 2010.

CHEN, W. H; LIN, B. J; LIN, Y. Y; CHU, Y. S; SHOW, A. T. U; LOKE, P; ONG, H. C; CHANG, J; HO, S. H; CULABA, A. B; PÉTRISSANS, A; PÉTRISSANS, M. **Progress in biomass torrefaction: Principles, applications and challenges.** Progress in Energy and Combustion Science, v. 82, 2021.

CHEN, W. H; PENG, J; BI, X. T. **A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 44, p. 847-866, 2015.

CHEN, Z; WANG, Y; CHENG, H; ZHOU, H. **Hemicellulose degradation: An overlooked issue in acidic deep eutectic solvents pretreatment of lignocellulosic biomass.** Industrial Crops and Products, v. 187, 2022.

CHEW, J. J; DOSHI, V. **Recent advances in biomass pretreatment – Torrefaction fundamentals and technology.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 15, ed. 15, p. 4212-4222, 2011.

CIOLKOSZ, D; WALLACE, R. **A review of torrefaction for bioenergy feedstock production.** Biofuel Bioprod Bior. p. 317-329, 2011.

CONAB. **Produção de cana chega a 610,1 milhões de toneladas na safra 2022/23 com melhora na produtividade nas lavouras,** 2023. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/4977-producao-de-cana-chega-a-610-1-milhoes-de-toneladas-na-safra-2022-23-com-melhora-na-productividade-nas-lavouras> >. Acesso em: 17/07/2023.

CONAB. **Safras,** 2022. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras> >. Acesso em: 18/09/2022.

CONAG, A. T; VILLAHERMOSA, J. E. R; CABATINGAN, L. K; WOO GO, A. **Predictive HHV Model for Raw and Torrefied Sugarcane Residues.** Waste and Biomass Valorization, p. 1929-1943, 2019.

CORREIA, M. A. C; SEYE, O; SILVA, A. M. P; SILVA, R. L. **Características e potencial energético do bagaço da cana-de-açúcar armazenado sem cobertura por um período prolongado;** Rama, v. 13, n. 1, 2020.

DENARI, G. B; CAVALHEIRO, E. T. G. **Princípios e Aplicações de Análise Térmica**, 2012. Disponível em: < https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/75/75135/tde-04042013-151955/publico/GabrielaBuenoDenari_Revisado_Anexo.pdf >. Acesso em: 23/11/2022.

DIAS, M. A. P. **Administração de Materiais: uma abordagem logística**. 4ª edição. São Paulo: Atlas, 2010.

DIAS, M. O. S; FILHO, R. M; MANTELATTO, P. E; CAVALETT, O; ROSSELL, C. E. V; BONOMI, A; LEAL, M. R. L. V. **Sugarcane processing for ethanol and sugar in Brazil**. *Environmental Development*, v. 15, p. 35-51, 2015.

ERIC, A; NEMODA, S; KOMATINA, M; DAKIC, D; REPIC, B. **Experimental investigation on the kinetics of biomass combustion in vertical tube reactor**. *Journal of the Energy Institute*, v. 92, ed. 4, p. 1077-1090, 2019.

EROL, M; HAYKIRI-ACMA, H; KÜÇÜKBAYRAK, S. **Calorific value estimation of biomass from their proximate analyses data**. *Renewable Energy*, v. 35, ed. 1, p. 170-173, 2010.

EXAME. **Etanol de segunda geração é combustível para o futuro**, 2023. Disponível em: < <https://exame.com/bussola/etanol-de-segunda-geracao-e-combustivel-para-o-futuro/> >. Acesso em: 30/06/2023.

FERNANDES, A. **Avaliação do Processo de Combustão da Biomassa (Bagaço de Cana) para Valorização das Cinzas Geradas**, 2019. Disponível em: < http://www.repositorio.jesuita.org.br/bitstream/handle/UNISINOS/8145/Altair%20Fernandes_.pdf?sequence=1&isAllowed=y >. Acesso em: 03/05/2023.

FILOSO, S; CARMO, J. B; MARDEGAN, S. F; LINS, S. R. M; GOMES, T. F; MARTINELLI, L. A; **Reassessing the environmental impacts of sugarcane ethanol production in Brazil to help meet sustainability goals**; *Renewable and Sustainable Energy*, v. 52, p. 1847-1856, 2015.

FIOMARI, M. C. **Análise energética e exergética de uma usina sucroalcooleira do oeste paulista com sistema de cogeração de energia em expansão**. Universidade Estadual Paulista (UNESP) campus de Ilha Solteira, 2004.

FLAUSINIO, B. F. P. G; COSTA, A. L; PINHEIRO, R. B; FORTINI, A. **Potential of the Bagasse Sugarcane to Electric Power Generation**. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, v. 5, ed. 11, 2015.

FRANCISCO, R. P. **Estudo termoquímico da queima de combustíveis em caldeiras usando balanços de energia**, 2012. Disponível em: < https://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/mestradoenergia/Dissertacoes/2009/Rodrigo_Pereira_Francisco.pdf >. Acesso em: 15/05/2023.

GEBBIE, L; DAM, T. T; AINSCOUGH, R; PALFREYMAN, R; CAO, L; HARRISON, M; O'HARA, I; SPEIGHT, R. **A snapshot of microbial diversity and function in an undisturbed sugarcane bagasse pile**. *BMC Biotechnology*, 2020.

GIRÃO, L. E. B. **Bagaço de cana-de-açúcar: investigação do poder calorífico e potencial energético**, 2016. Disponível em: < https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/35111/1/2016_tcc_lebgirao.pdf >. Acesso em: 04/12/2022.

GOMES, M. G. **Produção de biogás a partir de bagaço de cana-de-açúcar após pré-tratamento com ácido cítrico diluído**, 2019. Disponível em: < <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/27087/1/Produ%C3%A7%C3%A3o%20Biog%C3%A1s%20Baga%C3%A7o%20.pdf> >. Acesso em: 05/04/2022.

GONÇALVES, E. V. **Pirólise do bagaço de cana-de-açúcar em reator de leito fixo: efeito de parâmetros de processo no rendimento e na qualidade do bio-óleo, do carvão e dos gases gerados**, 2016. Tese (Mestrado em Engenharia Química). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Departamento de Engenharia Química. Universidade Estadual de Maringá, Maringá.

GRANADOS, D. A; RUIZ, R. A; VEGA, L. Y; CHEJNE, F. **Study of reactivity reduction in sugarcane bagasse as consequence of a torrefaction process**. Energy, v. 139, p. 818-827, 2017.

GROTTO, C. G. L; COSTA, A. M. F; COLARES, C. J. G; PEREIRA, D. H. **Caracterização da biomassa de bagaço de cana-de-açúcar com vistas energéticas**, 2021. Disponível em: < Caracterização da biomassa de bagaço de cana-de-açúcar com vistas energéticas | ScienceGate >. Acesso em: 30/10/2022.

GRUTA, C. G. L; COLARES, C. J. G; LIMA, D. R; PEREIRA, D. H; VALE, A. T. **Energy potential of biomass from two types of genetically improved rice husks in Brazil: A theoretical-experimental study**. Biomass and Bioenergy, v. 142, 2020.

HIMMEL, M. E; DING, S.; JOHNSON, D. K; ADNEY, W. S; NIMLOS, M. R; BRADY, J. W; FOUST, T. D. **Biomass Recalcitrance: Engineering Plants and Enzymes for Biofuels Production**. Science, v. 135, p. 804–807, 2007.

HOFSETZ, K; SILVA, M. P. **Brazilian sugarcane bagasse: Energy and non-energy consumption**. Biomass and Bioenergy, v. 46, p. 564-573, 2012.

HORST, D. J; BAHAINNE, J. J. R; JUNIOR, P. P. A. **Lignin as alternative fuel: an estimate of the thermal energy generation potential from brazilian crops**. Environmental Progress & Sustainable Energy, v. 36, ed. 3, p. 717-722, 2017.

HUANG, D; LI, R; XU, P; LI, T; DENG, R; CHEN, S; ZHANG, Q. **The cornerstone of realizing lignin value-addition: Exploiting the native structure and properties of lignin by extraction methods**. Chemical Engineering Journal, v. 402, 2020.

ISA (INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL). **Brasil chega na COP27 em meio a recorde de emissões de gases de efeito estufa**, 2022. Disponível em: < <https://www.socioambiental.org/noticias-socioambientais/brasil-chega-na-cop27-em-meio-recorde-de-emissoes-de-gases-de-efeito> >. Acesso em: 29/06/2023.

JAYARAMAN, K; GOKALP, I; PETRUS, S; BELANDRIA, V; BOSTYN, S. **Energy recovery analysis from sugar cane bagasse pyrolysis and gasification using**

thermogravimetry, mass spectrometry and kinetic models. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 132, p. 225-236, 2018.

JEONG, C. Y; DODLA, S. K; WANG, J. J. **Fundamental and molecular composition characteristics of biochars produced from sugarcane and rice crop residues and by-products.** Chemosphere, v. 142, p. 4-13, 2016.

JUNIOR, D. N. **Cana Energia um novo produto para o setor sucroenergético.** 2016. Disponível em: <<http://www.ideaonline.com.br/artigo/cana-energia-um-novo-produto-para-o-setor-sucroenergetico-por-dib-nunes-jr.html>>. Acesso em: 09/12/2022.

JUNIOR, M. A. V. **Conversão térmica e termocatalítica da biomassa utilizando materiais mesoporosos para a obtenção de hidrocarbonetos,** 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/25280/1/AntonioVicenteDeMendoncaJunior_DISSERT.pdf>. Acesso em: 01/05/2023.

KAMATE, S. C.; GANGAVATI, P. B. **Exergy analysis of cogeneration power plants in sugar industries.** Applied Thermal Engineering, v. 29, p. 1187–1194, 2009.

KHOO, R. Z; CHOW, W. S; ISMAIL, H. **Sugarcane bagasse fiber and its cellulose nanocrystals for polymer reinforcement and heavy metal adsorbent: a review.** Cellulose, v. 25, ed. 8, p. 4303-4330, 2018.

KRESNOWATI, M. T. A. P; DESIRIANI, R; WENTEN, I. G. **Ultrafiltration of Hemicellulose Hydrolysate Fermentation Broth.** Engineering International Conference, 2017.

KUMAR, B; VERMA, P. **Biomass-based biorefineries: An important archetype towards a circular economy.** Fuel, v. 288, 2021

LANDELL, G. A; PINTO, L. R; CRESTE, S; CHABREGAS, S. M.; BURNQUIST, W. L. **Technical road map for ethanol: genetic improvement and biotechnology.** Sugarcane bioethanol: R&D for productivity and sustainability. Ed. Blucher, 2010.

LARA, N. O. T. **Respostas morfoanatômicas e fisiológicas da cana-de-açúcar sob diferentes condições hídricas,** 2021. Disponível em: <https://faculdadegalileu.com.br/ebook_cana.pdf>. Acesso em: 17/06/2023.

LENÇO, P. C; QUINTERO, D. A. R; BIZZO, W. A. **Characterization of sugarcane bagasse particles separated by elutriation for energy Generation.** Renewable Energy, p. 712-721, 2020.

LIMA, L. G. P. R. **Melhoria na eficiência térmica de uma caldeira aquatubular alimentada a cavaco florestal,** 2018. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/16419/1/PG_DAMEC_2018_1_14.pdf>. Acesso em: 05/12/2022.

LIRA, J. O. B; SILVA, K. C. G. **Estudo das características de combustão de resíduos sólidos da região nordeste utilizando análise termogravimétrica.** p. 8661–8669, 2015

LISPERGUER, R. C; BATUECAS, E; MAYO, C; DÍAZ, R; PÉREZ, F. J; SPRINGER, C. **Sustainability assessment of electricity cogeneration from sugarcane bagasse in Jamaica.** Journal of Cleaner Production, v. 200, p. 390-401, 2018.

LIZCANO, J. V. **Poder calorífico, energia e cinzas da biomassa de cana-de-açúcar irrigada por gotejamento, para diferentes variedades, lâminas e processos de maturação,** 2015. Disponível em: < https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11152/tde-17092015-161201/publico/Jonathan_Vasquez_Lizcano_versao_revisada.pdf >. Acesso em: 04/12/2022.

MACHIN, E. B. **Análise técnica, econômica e ecológica da incorporação de sistemas de gaseificação de bagaço de cana-de-açúcar no setor sucroalcooleiro: uso de ciclos combinados para o aumento da oferta de eletricidade.** 2015. Disponível em: < <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/124515> >. Acesso em: 03/07/2023.

MANATURA, K. **Inert torrefaction of sugarcane bagasse to improve its fuel properties,** Case Studies in Thermal Engineering, v. 19, 2020.

MARCONDES, L. A. BUENO, S. M. **Processo de Lavagem a seco de cana-de-açúcar,** 2019. Disponível em: < <file:///C:/Users/rosin/Downloads/220-Texto%20do%20Artigo-710-1-10-20191028.pdf> >. Acesso em: 28/05/2023.

MARQUES, C. A; SILVA, D. A; APRESENTAÇÃO, M. J. F; NAKASHIMA, G. T; YAMAJI, F. M. **Produção de biochar com palha de cana-de-açúcar (Saccharum sp.).** Society and Development, v. 11, 2022.

MATOS, W. E. C; SILVA, H. J. B; PAZ, G. M; SANTOS, V. B. **Utilization of sugarcane bagasse ashes as filler or pozzolanic material for the cementitious mortar production: a review.** Revista Matéria, v. 26, ed. 4, 2021.

MELLES, V. **Torrefação do bagaço de cana-de-açúcar para fins energéticos,** 2018. Disponível em: < <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/203740/000924872.pdf?sequence=1&isAllowed=y> >. Acesso em: 29/05/2023.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Nacional de Energia 2050,** 2020. Disponível em: < https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico_563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf >. Acesso em: 02/07/2023.

MIRANDA, L. L. D; PIVETTA, J. P; FRACASSO, J. V. **Economic injury level for sugarcane caused by the spittlebug Mahanarva fimbriolata (Stål) (Hemiptera: Cercopidae).** 2008.

MORAIS, L. C; MAIA, A. A. D; GUANDIQUE, M. E. G; ROSA, A. H. **Pyrolysis and combustion of sugarcane bagasse.** Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2017.

MOUSA, E; WANG, C; RIESBECK, J; LARSSON, M. **Biomass applications in iron and steel industry: An overview of challenges and opportunities.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 65, p. 1247-1266, 2016.

NAKASHIMA, G. T; MARTINS, M. P; HANSTED, A. L. S; YAMAMOTO, H; YAMAJI, F. M. **Sugarcane trash for energy purposes: Storage time and particle size can improve the quality of biomass for fuel?.** Industrial Crops and Products, v. 108, p. 641-648, 2017.

NHUCHHEN, D. R; BASU, P; ACHARYA, B. **A Comprehensive Review on Biomass Torrefaction.** International Journal of Renewable Energy & Biofuels, v. 2014, 2014.

NOGUEIRA, M.F.M.; RENDEIRO, G. **Caracterização Energética da Biomassa Vegetal.** In: BARRETO, E.J.F. (Coord). Combustão e Gaseificação da Biomassa Sólida: Soluções Energéticas para a Amazônia. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008.

NUNES, J. V. S; NOGUEIRA, K. M. V; VIDAL, M. S; MALVEIRA, J. Q; RIOS, M. A. S. **Análise da viabilidade do bagaço-de-cana (saccharum spp) para a produção de briquetes,** 2017. Disponível em: < https://www.confex.org.br/sites/default/files/antigos/contecc2017/agronomia/3_advdbsspapdb.pdf >. Acesso em: 28/05/2023.

OLIVEIRA, A. **Cana-energia e alta produtividade por hectare,** 2016. Disponível em: < <http://www.producaodebiodiesel.com.br/mercado-de-combustiveis/cana-energia-e-alta-produtividade-por-hectare>>. Acesso em: 09/12/2022.

OLIVEIRA, C. M; PAVÃO, L. V; RAVAGNANI, M. A. S. S; CRUZ, A. J. G; COSTA, C. B. B. **Process integration of a multiperiod sugarcane biorefinery.** Applied Energy, 2018.

OLIVEIRA, R. A; BARROS, R. R. O; LEITÃO, V. S. F; FREITAS, S. P; BON, E. P. S. **Energy supply design for the integrated production of 1G + 2G ethanol from sugarcane.** Renewable Energy Focus, v. 35, 2020.

OYAMA, H. C. **Análise de processo em caldeiras da indústria Sucroenergética,** 2017. Disponível em: < <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/20152/3/An%C3%A1liseProcessoCaldeiras.pdf> >. Acesso em: 15/05/2023.

PARITOSH, K; MATHUR, S; PAREEK, N; VIVEKANAND, V. **Feasibility study of waste (d) potential: co-digestion of organic wastes, synergistic effect and kinetics of biogas production.** International Journal of Environmental Science and Technology, v. 15, p. 1009-1018, 2017.

PATTAMASUWAN, A; PHAEON, N; CHAPANYA, P; SRIROTH, K; WONGRAT, W; VANICHSRIRATANA, W. **Spontaneous Combustion Tendency in Bagasse Stockpiles: Biotic and Abiotic Responses Relation.** Sugar Tech, 2020.

PEDROSO, D. T; MACHIN, E. B; BARJAS, G. C; FLORES, M; URRÁ, H. G; CARVALHO, F. S; SANTOS, M. I. S; MACHIN, A. B; CANETTIERI, E. V; PÉREZ, N. P; LACAVA, P. T; SANTOS, L. R; JÚNIOR, J. A. C. **Sugarcane Bagasse Torrefaction for Fluidized Bed Gasification.** Applied Sciences, v. 11, ed. 13, 2021.

PENG, N; YAO, Z; WANG, Z; HUANG, J; KHAN, M. T; CHEN, B; ZHANG, M. **Fungal deterioration of the bagasse storage from the harvested sugarcane.** Biotechnology for Biofuels, 2021.

PÉREZ, A. A. D; PALACIO, J. C. E; VENTURINI, O. J. REYES, A. M. M; OROZCO, D. J. R; LORA, E. E. S; OLMO, O. A. A. **Thermodynamic and economic evaluation of reheat and regeneration alternatives in cogeneration systems of the Brazilian sugarcane and alcohol sector.** Energy, v. 152, p. 247-262, 2018.

PEÇANHA, T; MACEDO, M. M. S; SILVA, I. A; CHAVES, L. R; REZENDE, B. A. **Análise de custos da cogeração de energia elétrica a partir da Biomassa agroindustrial e florestal em uma usina do centro-oeste mineiro,** 2018. Disponível em: < https://sistemas.ambui.ifmg.edu.br/open_conference/index.php/jornadacientifica/jc2018/paper/viewFile/86/33 >. Acesso em: 01/07/2023.

PIRES, I. C. S. A. (2017). **Produção e caracterização de biochar de palha de cana-de-açúcar (Saccharum sp.).** Tese (Dissertação de Mestrado em Ciência dos Materiais). Programa de Pós-graduação em Ciência dos Materiais do Centro de Ciências e Tecnologias para a Sustentabilidade. Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba.

POSOM, J; PHUPHAPHUD, A; SAENGPRACHATANARUG, K; MARAPHUM, K; SAIJAN, S; PONGKAN, K; SRIMAI, K. **Real-time measuring energy characteristics of cane bagasse using NIR spectroscopy.** Sensing and Bio-Sensing Research, v. 38, 2022.

RAINEY, T. J; O'HARA, I. M; MANN, A. P; BAKIR, C. H; PLAZA, F. **Effect of depithing on the safety and environmental aspects of bagasse stockpiling.** Process Safety and Environmental Protection, v. 91, ed. 5, p. 378-385, 2013.

RAMBO, M. K. D; RAMBO, M. C. D; RODRIGUES, K. J. C; ALMEIDA, G. P. A. **Estudo de análise termogravimétrica de diferentes biomassas lignocelulósicas utilizando a análise por componentes principais,** 2015. Disponível em: < <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/18332/pdf> >. Acesso em: 19/07/2023.

RIBEIRO, J. M. C; GODINA, R; MATIAS, J. C. O; NUNES, L. J. R. **Future Perspectives of Biomass Torrefaction: Review of the Current State-Of-The-Art and Research Development.** Sustainability, 2018.

RIPOLI, M. L. C.; RIPOLI, T. C. C. **Plantadoras nos canaviais.** Cultivar Máquinas, v. 6, n. 55, p. 16-19, 2006.

RODRIGUES, G. S. S. C; ROSS, J. L. S. **A Trajetória da cana-de-açúcar no Brasil: perspectivas geográfica, histórica e ambiental.** Uberlândia: Edufu, 2020.

ROJEK, B; WESOLOWSKI, M. **Compatibility study of theophylline with excipients using thermogravimetry supported by kinetic analysis.** Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2021.

SALEHI, F. A; ABDOLI, M. A; SHOKOUHMAND, H; JAFARI, H. R. **Techno-economic assessment for energy generation using bagasse: case study.** Energy Research, v. 37, ed. 8, p. 982-990, 2012.

SALINAS, C. T; PU, Y; LOU, C; SANTOS, D. B. **Experiments for combustion temperature measurements in a sugarcane bagasse large-scale boiler furnace.** Applied Thermal Engineering, v. 175, 2020.

SALMINEN, J; SAIRANEN, H; PATEL, S; SALORANTA, M. O; KAJASTIE, H; HEINONEN, M. **Effects of Sample Handling and Transportation on the Moisture Content of Biomass Samples**. International Journal of Thermophysics, 2018.

SANTOS, A. B; BOTTCHER, A; KIYOTA, E; MAYER, J. L. S; VICENTINI, R; BRITO, M. S; CRESTE, S; LANDELL, M. G. A; MAZZAFERA, P. **Water stress alters lignin content and related gene expression in two sugarcane genotypes**. Journal Agric. Food Chem, v. 63, p. 4708-4720, 2015.

SANTOS, L. R. **Adição de cinza do bagaço da cana-de-açúcar como finos no concreto autoadensável: estudo do ataque por sulfatos**, 2019. Trabalho de conclusão de curso, Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Paraná.

SANTOS, M. L; LIMA, O. J; NASSAR, E. J; CIUFFI, K. J; CALEFI, P. S. **Estudo das condições de estocagem do bagaço de cana-de-açúcar por análise térmica**. Química Nova, v. 34, p. 507-511, 2011.

SANTOS, S. F. **Aproveitamento do bagaço da indústria da cana-de-açúcar como incremento à matriz energética renovável**, 2020. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental). Programa de Doutorado em Tecnologia Ambiental do Centro de Ciências Exatas, Naturais e Tecnologias. Universidade de Ribeirão Preto. Ribeirão Preto.

SILVA, L. R. S; FINZER, J. R. D; BEGNINI, M. L. **Cálculo da relação ar/combustível e a eficiência em caldeira alimentada com bagaço de cana-de-açúcar**. 2018. Disponível em: < <https://repositorio.uniube.br/bitstream/123456789/487/1/Calculo%20da%20relacao%20ar%20Ocombustivel.pdf> >. Acesso em: 03/05/2023.

SILVA, R. N; LIMA, F. E. **Impact study of sugarcane bagasse moisture content in cogeneration systems**. Scientific Journal of Environmental Sciences and Biotechnology, p. 25-33, 2020.

SINGH, O. K. **Application of Kalina cycle for augmenting performance of bagasse-fired cogeneration plant of sugar industry**. Fuel, v. 267, 2020.

SOCCOL, C. R; VANDENBERGHE, L. P. S; MEDEIROS, A. B. P; KARP, S. G; BUCKERIDGE, M; RAMOS, L. P; PITARELO, A. P; LEITÃO, V. F; GOTTSCHALK, L. M. F; FERRARA, M. A; BON, E. P. S; MORAES, L. M. P; ARAÚJO, J. A; TORRES, F. A. G. **Bioethanol from lignocelluloses: Status and perspectives in Brazil**. Bioresource Technology, v. 101, ed. 13, p. 4820-4825, 2010.

SOUZA, C. C; LEANDRO, J. P.; NETO, J. F. R.; FRAINER, D. M.; CASTELÃO, R. A. **Cogeneration of electricity in sugar-alcobol plant: Perspectives and viability**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 91, p. 832–837, 2018.

SOUZA, A. J. P. **Avaliação das impurezas na cana-de-açúcar a partir das formas de colheita**, 2017. Disponível em: < <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/16103/1/AJPS23102019.pdf> >. Acesso em: 18/07/2023.

STELT, M. J. C; GERHAUSER, H; KIEL, J. H. A; PTASINSKI, K. J. **Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review**. Biomass and Bioenergy, v. 35, ed. 9, p. 3748-3762, 2011.

SUN, D; LV, Z. W; RAO, J; TIAN, R; SUN, S. N; PENG, F. **Effects of hydrothermal pretreatment on the dissolution and structural evolution of hemicelluloses and lignin: A review**. Carbohydrate Polymers, v. 281, 2022.

SUN, R. C. **Lignin Source and Structural Characterization**. Chemistry Europe, v. 13, ed. 17, p. 4385-4393, 2020.

TEIXEIRA, F. S; VIDIGAL, S. S. M. P; PIMENTEL, L. L; COSTA, P. T; PINTADO, M. E; ALCALÁ, L. M. R; **Bioactive Sugarcane Lipids in a Circular Economy Context**; Foods, v. 10, n. 5, 2021.

TEIXEIRA, L. P; ANDRADE, E. T; ESPÍNDOLA, J. Z; PEREIRA, R. G. **Determinação do equilíbrio higroscópico e do calor isotérico do Bagaço de cana-de-açúcar**. Revista Engenharia Agrícola, v. 35, p. 555-566, 2015.

TEMPESTA, H. N. **Caracterização das emissões gasosas provenientes da queima de biomassa de bagaço de cana de açúcar**, 2022. Disponível em: < https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/216631/tempesta_hn_tcc_araiq.pdf?sequence=4&isAllowed=y >. Acesso em: 18/07/2023.

TORGBO, S; QUAN, V. M; SUKYAI, P. **Cellulosic value-added products from sugarcane bagasse**. Springer Nature, 2021.

TUMULURU, J. S; SOKHANSANJ, S; HESS, J. R; WRIGHT, C; BOARDMAN, R. D. **A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications**. Industrial Biotechnology, p. 309-404, 2011.

TUMULURU, J. S; WRIGHT, C. T, BOARDMAN, R. D, YANCEY, N. A, SOKHANSANJ S. **A review on biomass classification and composition, co-firing issues and pre-treatment methods**. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2011

UPTON, B. M; KASKO, A. M. **Strategies for the Conversion of Lignin to High-Value Polymeric Materials: Review and Perspective**. American Chemical Society, 2015.

VALIX, M; KATYAL, S; CHEUNG, W. H. **Combustion of thermochemically torrefied sugar cane bagasse**. Bioresource Technology, v. 223, p. 202-209, 2017.

VAMVUKA, D.; KAKARAS, E. **Ash properties and environmental impact of various biomass and coal fuels and their blends**. Fuel Processing Technology, v. 92, p. 570-581, 2011.

WANG, S; BAI, J; INNOCENT, M. T; WANG, Q; XIANG, H; TANG, J; ZHU, M. **Lignin-based carbon fibers: Formation, modification and potential applications**. Green Energy & Environment, v. 7, ed. 4, p. 578-605, 2022.

WANG, Y; KALSCHEUR, J; EBIKADE, E; LI, Q; VLACHOS, D. G. **LigninGraphs: lignin structure determination with multiscale graph modeling.** Journal of Cheminformatics, 2022.

YU, H; YOU, Y; LEI, F; LIU, Z; ZHANG, W; JIANG, J. **Comparative study of alkaline hydrogen peroxide and organosolv pretreatments of sugarcane bagasse to improve the overall sugar yield.** Bioresource Technology, v. 187, p. 161-166, 2015.

ZHOU, X; LI, W; MABON, R; BROADBELT, L. J. **A mechanistic model of fast pyrolysis of Hemicellulose.** Energy & Environmental Science, v.11, 2018.