

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

**ANÁLISE DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR COMO FONTE DE  
ENERGIA**

**Décio Júnior Lovison Dori**

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

Orientador: **Prof. Dr. Fábio Bentes Freire**

Coorientadora: **Dra. Vanessa Dal-Bó**

**São Carlos – SP**

**2022**

**BANCA EXAMINADORA**

Trabalho de Graduação apresentado no dia 14 de abril de 2022 perante a seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Fábio Bentes Freire, DEQ/UFSCar

Coorientadora: Dra. Vanessa Dal-Bó

Convidado: Prof. Dr. José Teixeira Freire, DEQ/UFSCar

Professor da Disciplina: Prof. Dr. Fábio Bentes Freire, DEQ/UFSCar

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha família, pelo apoio e por tudo que fizeram por mim, sempre me ajudando e confiando em mim.

Ao DEQ/UFSCar por me proporcionar experiências e ensinamentos que mudaram a minha vida.

Um agradecimento especial a todos aqueles que tiveram participação direta nesse trabalho, meu orientador professor Fábio e coorientadora Vanessa, ao professor Freire, e a meus colegas Arthur, Rui e Vitor.

E um agradecimento a todos os amigos que a universidade me presenteou, com ótimos momentos de descontração e muito companheirismo nas atividades curriculares e pessoais, sempre pensando em ajudar uns aos outros.

## RESUMO

A cana-de-açúcar destaca-se historicamente no Brasil como um de seus principais produtos, contribuindo inclusive para a colonização das terras. Atualmente o Brasil destaca-se como o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com mais de 750 milhões de toneladas produzidas em 2020, correspondente a 40,5% de toda produção mundial. Aproximadamente 28% da massa de cana se resume ao bagaço, um dos principais resíduos agroindustriais. Descartado por anos, ele adquiriu relevância gerando energia para as usinas de açúcar e álcool por meio da sua combustão nas caldeiras, fornecendo ainda uma nova fonte de receita por meio da venda do excedente de energia. A grande versatilidade da cana, aliada à busca de fontes sustentáveis em substituição aos combustíveis fósseis, traz a necessidade do estudo e conhecimento das propriedades dessa biomassa, a fim de se obter uma maior eficiência do processo de combustão. Dessa maneira, o presente estudo realizou a caracterização do bagaço quanto a massa específica aparente, distribuição granulométrica com ajuste de modelos, análise imediata e termogravimétrica. Ainda, foram realizadas compactações para o material de diferentes granulometrias, assim como a combustão de um *pellet* otimizado. A biomassa analisada mostrou-se heterogênea e irregular, com 60% das partículas menores que 1,5 mm, o que beneficia a combustão do material. Da análise imediata foram obtidos elevado teor de voláteis e baixa concentração de cinzas, favorecendo a ignição e reduzindo os resíduos gerados durante a queima, mas sua umidade foi superior a 31%, valor elevado, destacando a necessidade de uma etapa de secagem previamente a queima. Da análise termogravimétrica verificou-se a presença de compostos orgânicos de alto poder calorífico e a influência negativa da presença de umidade no material, com menor energia liberada durante a combustão e a maior formação de resíduos. Sua compactação foi satisfatória, observando-se interferência direta do tamanho de partícula e da faixa de granulometria na qualidade dos *pellets*. O poder calorífico superior obtido foi de 16,22 MJ/kg, confirmando o seu potencial energético. A importância da caracterização da biomassa foi verificada através dos dados obtidos, e o bagaço de cana-de-açúcar se mostrou favorável à combustão para a geração de energia.

**Palavras-chave:** Biomassa, Caracterização, Cogeração, Combustão, Fontes renováveis, Resíduo.

## ABSTRACT

Sugarcane stands out historically in Brazil as one of the main commodities, also contributing to the colonization. Currently, Brazil is the world's largest sugarcane producer, with 750 million tons produced in 2020, representing 40.5% of world production. Approximately 28% of the sugarcane mass is reduced to bagasse, one of main agro-industrial residues. Discarded for years, it became relevant generating energy for sugar alcohol factories through its combustion in boilers, also providing a new source of revenue through the sale of surplus electricity. The versatility of sugarcane, allied with the search for sustainable sources to replace fossil fuels, shows the need of study and knowledge of the characteristics of this biomass, in order to achieve greater efficiency from the combustion process. Therefore, this study carried out the characterization of bagasse in terms of apparent specific gravity, particle size distribution with models adjustment, proximate and thermogravimetric analysis. Also, agglomeration process were carried out for the material with different particle size, as well as the combustion of an optimized pellet. The analyzed biomass was heterogeneous and irregular, with 60% of the particles smaller than 1.5 mm, favoring the combustion of the material. From the proximate analysis, high volatile content and low ash concentration were obtained, promoting ignition and reducing residues generated during burning, but its humidity was higher than 31%, an increased value, reinforcing the need for a drying step preceding the burning. The thermogravimetric analysis showed the presence of elevated heating value organic compounds, and the negative effects of the water in the material, with less energy released during combustion and a larger formation of residues. Its compaction was satisfactory, verifying direct interference of the particle size in the quality of the pellets. The higher heating value obtained was 16.22 MJ/kg, emphasizing the energy potential of this residual biomass. The importance of biomass characterization was verified through the results obtained, and sugarcane bagasse proved to be favorable to combustion for energy generation.

**Keywords:** Biomass, Characterization, Cogeneration, Combustion, Renewable Sources, Residue.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Evolução do consumo energético mundial por fonte.....	13
Figura 2.2. Matriz energética mundial de 2019.....	14
Figura 2.3. Matriz energética brasileira de 2020.....	15
Figura 2.4. Evolução da participação das fontes renováveis na Oferta Interna de Energia.	16
Figura 2.5. Mudanças de temperaturas globais, observado e simulado sem atividades humanas.....	16
Figura 2.6. Participação na produção mundial de cana-de-açúcar (milhões de toneladas).	19
Figura 2.7. Área destinada à produção por produto (milhões de hectares). ....	20
Figura 2.8. Participação da produção nacional de cana-de-açúcar, por estado. ....	21
Figura 2.9. Fluxograma simplificado da produção de açúcar e etanol. ....	22
Figura 2.10. Combustão de uma pequena partícula de biomassa, representando as diferentes etapas. ....	25
Figura 3.1. Amostragem do bagaço de cana-de-açúcar utilizado nos experimentos.....	33
Figura 3.2. Mufla utilizado nos experimentos de teor de voláteis e cinzas. ....	37
Figura 3.3. Equipamento utilizado para análise termogravimétrica.....	39
Figura 3.4. Representação do molde utilizado para confecção dos pellets. ....	40
Figura 3.5. Sistema utilizado para o processo de combustão. ....	41
Figura 4.1. Distribuição de Frequência. ....	43
Figura 4.2. Distribuição Cumulativa. ....	43
Figura 4.3. Ajuste do modelo de RRB para os dados experimentais. ....	45
Figura 4.4. Curvas TGA e DTA para o bagaço de cana in natura.....	48
Figura 4.5. Curvas TGA e DTA para o bagaço de cana seco.....	49
Figura 4.6. Pellets de diferentes granulometrias após uma semana. ....	50
Figura 4.7. Massa do <i>pellet</i> e temperatura no processo de combustão.....	52

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1. Área, produção e rendimento médio das principais culturas no Brasil em 2020. .....	20
Tabela 2.2. Análise imediata do bagaço de cana-de-açúcar e biomassas semelhantes. ....	28
Tabela 2.3. Valores do Poder Calorífico Superior para o bagaço de cana e biomassas semelhantes.....	31
Tabela 3.1. Série Tyler e abertura das peneiras utilizadas.....	34
Tabela 3.2. Modelos para distribuição granulométrica. ....	35
Tabela 4.1. Valores dos parâmetros e coeficiente de correlação para os modelos aplicados. .....	44
Tabela 4.2 – Dados de análise imediata e PCS, obtidos experimentalmente e encontrados na literatura.....	46
Tabela 4.3. Variações de massa e dimensões dos <i>pellets</i> após uma semana. ....	51

## SUMÁRIO

Banca examinadora.....	i
Agradecimentos.....	ii
Resumo.....	iii
Abstract.....	iv
Lista de Figuras.....	v
Lista de Tabelas.....	vi
1. INTRODUÇÃO.....	9
1.1. Motivação do estudo.....	9
1.2. Objetivos.....	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1. Consumo energético.....	12
2.2. Biomassa.....	17
2.3. Cana-de-açúcar.....	18
2.4. Combustão.....	24
2.5. Caracterização de biomassa.....	26
2.5.1. Massa específica.....	26
2.5.2. Granulometria.....	27
2.5.3. Análise imediata.....	27
2.5.4. Poder calorífico (PC).....	30
2.5.5. Análise termogravimétrica.....	32
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
3.1. Matéria-Prima.....	33
3.2. Caracterização da Biomassa.....	34
3.2.1. Massa específica aparente.....	34
3.2.2. Granulometria.....	34
3.2.3. Análise imediata.....	36
3.2.4. Análise termogravimétrica.....	39
3.2.5. Peletização.....	40
3.2.6. Combustão.....	41
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
4.1. Massa específica aparente.....	42
4.2. Distribuição Granulométrica.....	42
4.3. Análise imediata e Poder Calorífico Superior.....	46

4.4.	Termogravimetria .....	48
4.5.	Pelletização .....	50
4.6.	Combustão .....	51
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....	53
	REFERÊNCIAS .....	55

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Motivação do estudo

Uma das mais importantes discussões que permeiam a sociedade atual diz respeito ao paradigma entre desenvolvimento tecnológico e sustentável. Estudo publicado por Neto, Corrêa e Perobelli (2016) correlaciona o aumento da demanda energética de um país com o crescimento de seu Produto Interno Bruto (PIB). Entretanto, a visão ambiental vem sendo cada vez mais debatida, buscando-se alternativas de desenvolvimento sustentável, tendo em vista a possibilidade da racionalização de recursos para preservar as futuras gerações (SANTOS; RODRIGUES; CARNIELLO, 2021).

Na história mundial, o desenvolvimento das sociedades foi pautado na utilização de fontes energéticas não renováveis, principalmente com os combustíveis fósseis. Isso leva a efeitos ambientais, com a emissão de poluentes e gases de efeito estufa (GEE), o que proporciona grande dúvida quanto à sustentabilidade e fornecimento de recursos de longo prazo do planeta (NASCIMENTO; MENDONÇA; CUNHA, 2012).

Os impactos ambientais causados pela utilização de fontes não renováveis para o suprimento energético constituem o ponto central das discussões ambientais. Já 1997, o Protocolo de Kyoto, substituído pelo Acordo de Paris em 2020, foi formulado buscando reduzir as emissões de GEE. O Programa Europeu para as Alterações Climáticas tem como meta a redução gradual das emissões de GEE ao longo dos anos, até a redução de 80% em 2050. Para a obtenção do sucesso de tais metas é fundamental o aumento da fração energética proveniente de fontes renováveis (ARAÚJO, 2008).

As fontes renováveis têm a capacidade de se manter a longo prazo, estando entre elas a energia eólica, solar térmica, fotovoltaica e a biomassa (GOLDENBERG, 2015). A biomassa, por sua vez, apresenta enorme potencial, em razão de poder ter sua origem de resíduos provenientes da agricultura. Como o Brasil é incontestavelmente o maior produtor agrícola mundial, o potencial energético da biomassa se torna um ponto de interesse para estudo pelos brasileiros. (ARAÚJO, 2008).

O ESG, *Environmental, Social and Governance* (ambiental, social e governança), que remete a práticas sociais e ambientais aliadas à governança de uma empresa, vem se tornando cada vez mais popular tendo em vista a necessidade da adoção de uma visão sustentável para a indústria e negócios. No mercado de capitais o ESG já pode ser considerado um diferencial para investimentos, uma vez que as empresas que adotam essas medidas apresentam

impactos positivos em seus balanços ao longo do tempo, pois operações mais sustentáveis, com mitigação de riscos geram resultados a longo prazo (PWC, 2021; SANTOS; RODRIGUES; CARNIELLO, 2021).

A cana-de-açúcar é um dos principais produtos agrícolas brasileiros e a segunda maior *commodity* produzida mundialmente (IBGE, 2018). Ela faz parte da história do Brasil, servindo como um fator para a colonização das terras do país e, durante um longo período foi a base econômica colonial, por meio da exportação de açúcar durante os séculos XVI e XVIII. Mesmo perdendo espaço no mercado mundial após esse período, ao final do século XX ela voltou a apresentar uma relevância econômica em 1973, com o choque do petróleo. Tal evento fez com que o governo brasileiro buscasse alternativas energéticas ao petróleo, criando em 1975 o Programa Nacional do Álcool (ProÁlcool), o qual fomentou a cultura da cana-de-açúcar por meio de diversos incentivos para a indústria sucroalcooleira e para as automobilísticas, para elas desenvolverem carros movidos a álcool. No início da década de 1990 o programa terminou, devido a questões de endividamento do governo, como consequência dos benefícios concedidos, além da queda internacional nos preços do petróleo. Entretanto, essa indústria já havia se consolidado, e, um novo choque do petróleo no início do século XXI reforçou ainda mais o potencial do biocombustível proveniente da cana (COPERSUCAR, 2017).

A partir de então, a cana de açúcar passou a tomar cada vez mais a paisagem brasileira, especialmente da região Sudeste. Segundo dados da produção agrícola municipal do IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2021), sua produção nacional no ano de 2020 foi de mais de 757 milhões de toneladas, o que corresponde a pouco mais de 40% de toda a produção mundial.

Aproximadamente 28% da massa de cana-de-açúcar produzida se resume ao bagaço de cana, um dos resíduos agroindustriais mais abundantes no país. Durante um longo período esse resíduo foi incinerado nas plantações com o simples objetivo de reduzir o seu volume ocupado, entretanto, ele passou a ser utilizado no processo de cogeração nas caldeiras das indústrias sucroalcooleiras. Isso não só fez das usinas de açúcar e álcool autossuficientes, como também favoreceu a obtenção de uma nova fonte de receita com a venda do excedente de energia elétrica (GEBRIN et al., 2021).

Todavia, o descarte do bagaço ainda é recorrente e, seu armazenamento é feito de maneira precária, em enormes montes de resíduos a céu aberto. Isso pode levar a processos

ineficientes de combustão, ocasionando na emissão de poluentes e não aproveitando todo o potencial energético desse material. Dessa maneira, o conhecimento e caracterização do bagaço de cana-de-açúcar se faz uma necessidade para a maior eficiência do processo de cogeração (GEBRIN et al., 2020).

## **1.2. Objetivos**

O presente estudo teve como objetivo realizar a caracterização da biomassa do bagaço de cana-de-açúcar para a geração de energia, por meio do processo de combustão.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Consumo energético**

No decorrer da história, a energia se demonstrou inerente ao desenvolvimento das civilizações (GOLDENBERG, 1998). Há vestígios da utilização do fogo, a primeira forma de energia explorada, datados a mais de 1,9 milhão de anos por hominídeos (BOWMAN et al., 2009). Nas sociedades primitivas a energia era obtida por meio da lenha das florestas, possuindo um custo praticamente nulo, com o objetivo de satisfazer suas primeiras necessidades, as quais eram essencialmente o aquecimento, a alimentação e uma fonte luminosa noturna (FONSECA, 1972; GOLDENBERG; LUCON, 2007).

Com a sedentarização dos primeiros grupos, o homem pôde desenvolver a agricultura e pecuária, armazenando o excedente de energia nos animais e alimentos, permitindo que ele se dedicasse a outras atividades, como, por exemplo, olaria, artesanato da cerâmica e outros artefatos (TESSMER, 2002; FARIAS; SELLITTO, 2011).

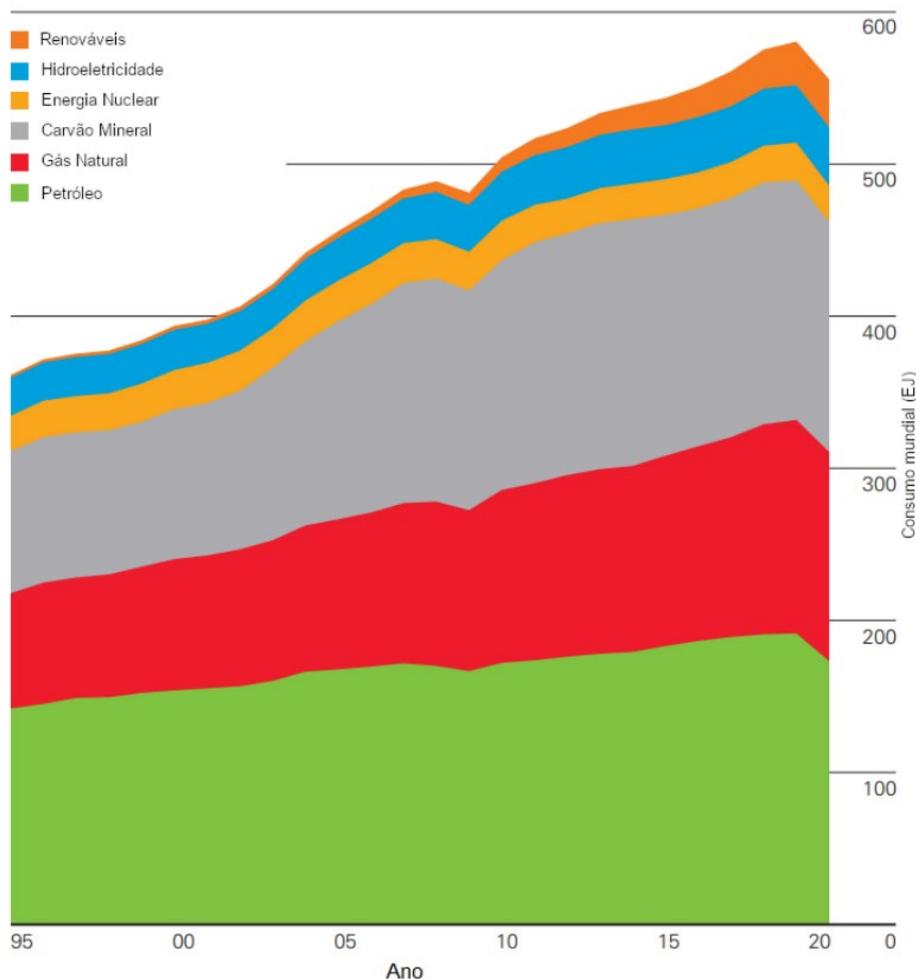
As civilizações se desenvolveram e cresceram, com uma demanda energética cada vez maior, de forma que se tornou necessária a utilização de novas fontes, como a força de cursos d'água e dos ventos (GOLDENBERG, 2007).

O amplo conhecimento científico difundido na Europa promoveu profundas mudanças entre 1760 e 1840, durante a Revolução Industrial. O início da atividade industrial de bens de produção e consumo, com a criação e o aperfeiçoamento da máquina a vapor, trouxe avanços tecnológicos que exigiram novos suprimentos de energia, com a utilização do carvão (TESSMER, 2002; MOREIRA, 2011; CARVALHO, 2014).

É possível notar que a crescente demanda de energia está diretamente ligada à evolução econômica e tecnológica da sociedade (SANTOS; RODRIGUES; CARNIELLO, 2021). Ferreira Neto, Corrêa e Perobelli (2016) estudaram a relação entre a demanda energética e o PIB de um país, mostrando haver forte dependência entre o crescimento econômico e o aumento do consumo energético.

Conforme mostra a Figura 2.1, o consumo energético mundial cresce desde 1995, com apenas as exceções dos anos de 2009 e 2020 (BP, 2021). Em 2009 houve efeitos causados pela crise de 2008, onde a retração nas taxas de crescimento dos países foi em uma média de 5% (BERKMEN et al., 2009). Em 2020 ocorreu declínio no consumo energético causado pelo efeito da pandemia do coronavírus na economia global, saindo de uma taxa de média de crescimento de 2,5% em 2019 para uma recessão de 3,5% em 2020 (LU, 2021).

Figura 2.1. Evolução do consumo energético mundial por fonte



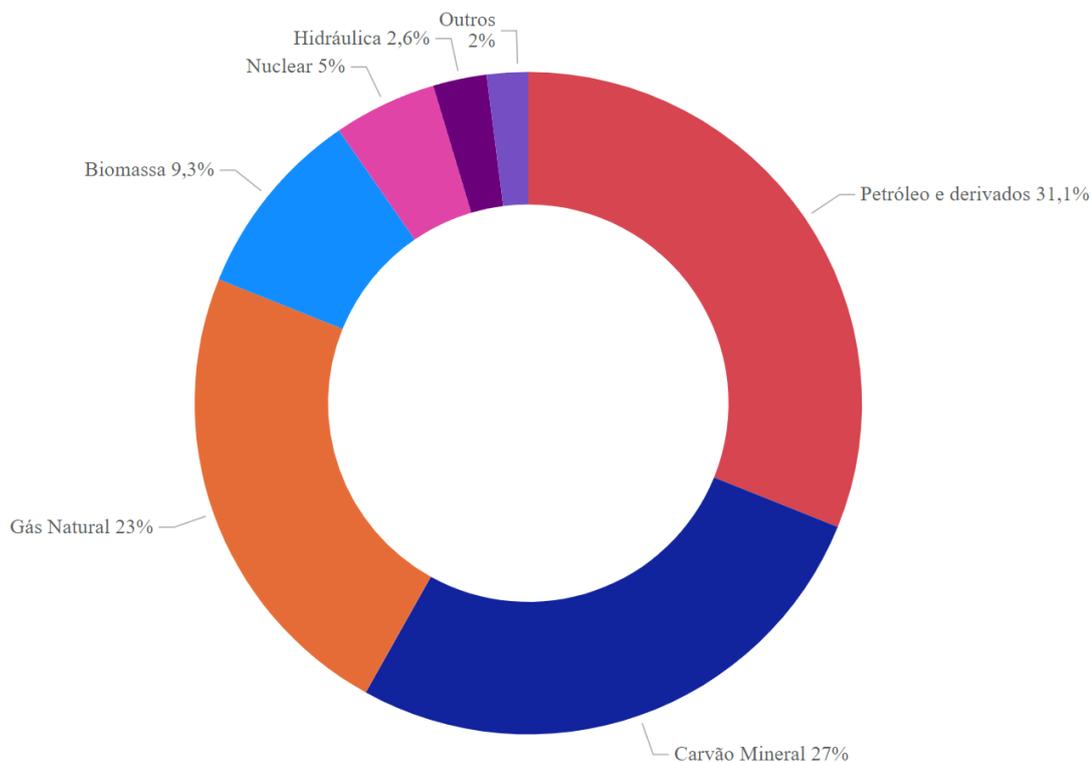
Fonte: Adaptado de BP - *British Petroleum*, 2021

A matriz energética mundial (Figura 2.2) é composta, em sua maioria, por fontes não renováveis. Embora o carvão mineral, consolidado durante a Revolução Industrial, seja uma fonte muito utilizada até os dias atuais, o petróleo foi o combustível que firmou o modelo industrial moderno, de produção em massa com setores dinâmicos, que levou ao desenvolvimento tecnológico de indústrias satélites (CARVALHO, 2014; IEA, 2021).

Dessa forma, surgiram os padrões mundiais de produção e consumo de energia baseados na utilização de combustíveis fósseis, como petróleo, carvão mineral e gás natural. Como limitante, esses combustíveis geram poluentes e gases de efeito estufa, o que não se sustenta a longo prazo (GOLDENBERG, 2007). Esse perfil de consumo pode ser observado na Figura 2.2. O petróleo e seus derivados, somados ao carvão mineral e ao gás natural

representam 81,1% de toda a matriz energética, e, considerando ainda a energia nuclear, mais de 86% da matriz energética mundial baseia-se em fontes não renováveis.

Figura 2.2. Matriz energética mundial de 2019



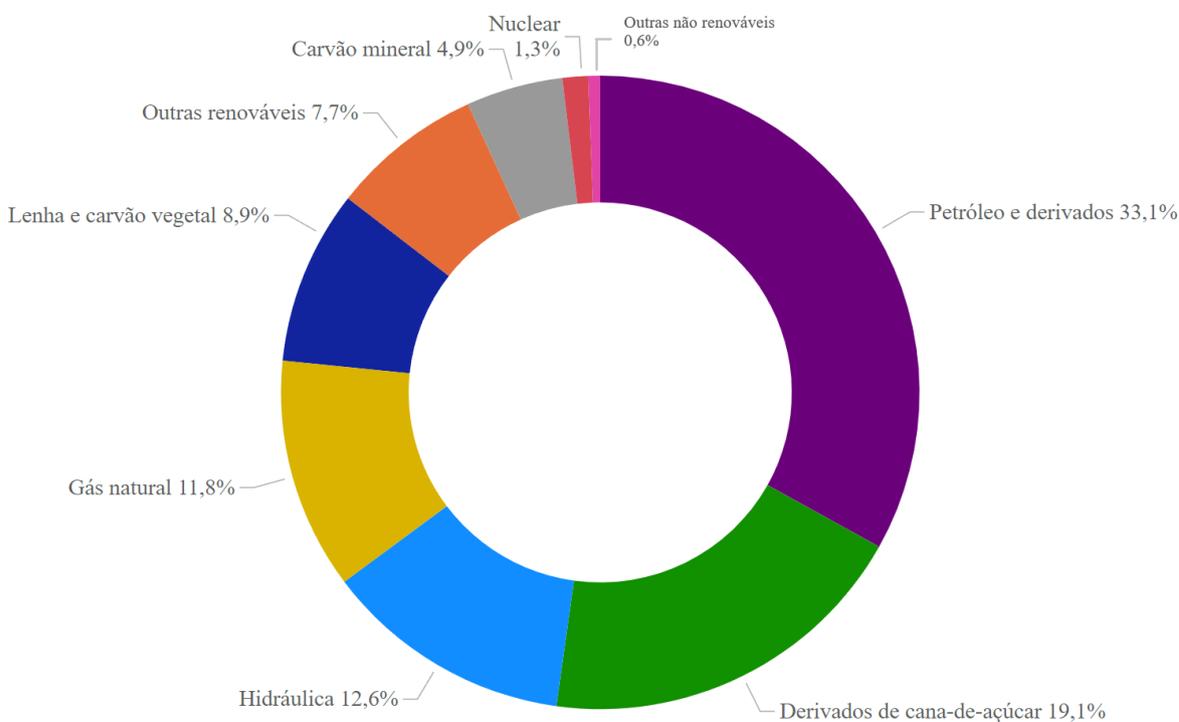
**Fonte:** Adaptado de IEA - *International Energy Agency*, 2021.

Há uma diferença entre matriz energética e matriz elétrica. Enquanto a primeira engloba todo o conjunto de fontes de energia disponíveis para movimentar veículos, preparar comida e gerar eletricidade, a segunda constitui-se pelo conjunto de fontes disponíveis apenas para a geração de energia elétrica. Ou seja, a matriz elétrica está englobada na matriz energética (EPE, 2021).

Já o Brasil destaca-se por ser um país com elevado percentual de fontes renováveis de energia (EPE, 2021). Ao comparar-se as matrizes energéticas mundial e brasileira, representadas na Figura 2.2 e Figura 2.3, respectivamente, pode-se evidenciar que enquanto a matriz mundial se apoia especialmente em fontes não renováveis, somando mais de 86%

do total, no Brasil o uso de fontes renováveis representa quase metade de sua matriz energética, com 48,3%.

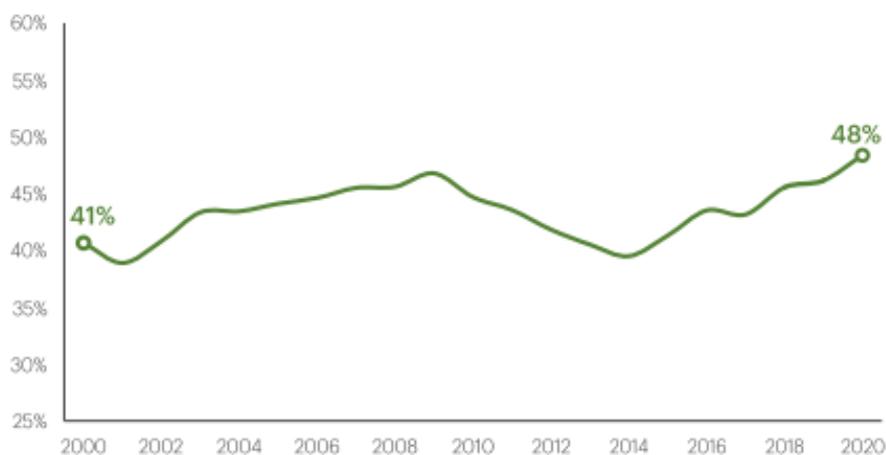
Figura 2.3. Matriz energética brasileira de 2020.



**Fonte:** Adaptado de EPE, BEN – Balanço Energético Nacional, 2021.

Esse fato ocorre dentro de um contexto histórico, desde o início do século XXI a participação das fontes renováveis na matriz energética brasileira se manteve estável, acima dos 40%. Entretanto, entre os anos de 2011 e 2014, houve uma queda na oferta de energias renováveis devido à crise hídrica causada pela estiagem. A partir de 2015, verifica-se que as fontes renováveis retomam o crescimento especialmente pela expansão da oferta de derivados de cana-de-açúcar, biodiesel e energia eólica, conforme apresentado na Figura 2.4 (EPE, 2021).

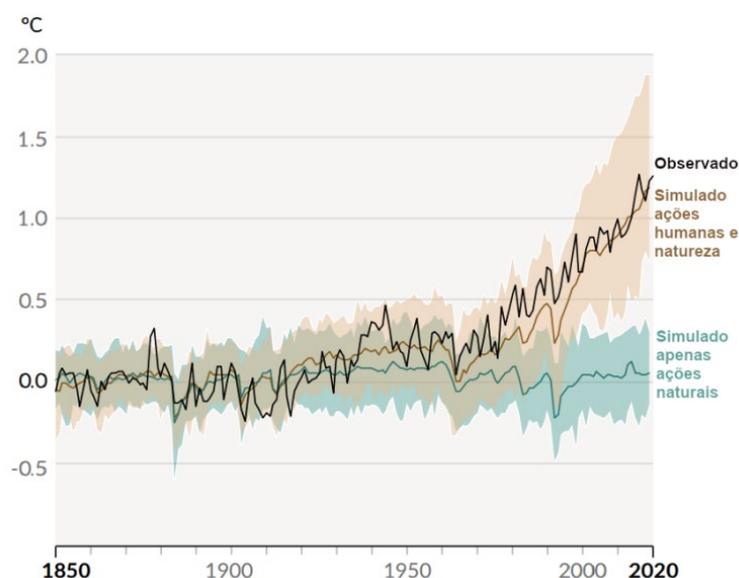
Figura 2.4. Evolução da participação das fontes renováveis na Oferta Interna de Energia.



**Fonte:** EPE – Atlas de Eficiência Energética Brasil 2021, 2021.

A alta participação de fontes renováveis na matriz energética coloca o Brasil ao encontro das aspirações dos países desenvolvidos, os quais estão cada vez mais em busca de substituir suas matrizes baseadas essencialmente em combustíveis fósseis, por alternativas limpas e renováveis (DIEESE, 2021). As emissões de poluentes e GEE geradas por atividades humanas já estão causando alterações climáticas. Segundo estudo do IPCC (*The Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2021), as atividades humanas já causaram a alteração das temperaturas globais mais de 1°C, conforme observado na Figura 2.5.

Figura 2.5. Mudanças de temperaturas globais, observado e simulado sem atividades humanas.



**Fonte:** Adaptado de IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2021.

Dessa forma, a busca pela transição energética da economia baseada em fontes não renováveis para fontes limpas está cada vez mais em pauta, e já faz parte da realidade mundial. Entre as principais fontes renováveis estão a hidráulica, fotovoltaica, eólica e a biomassa. Um dos maiores desafios está na busca desses recursos alternativos que tenham menor reflexo ambiental e sejam economicamente viáveis. A biomassa deve ser ponderada como uma alternativa de longo prazo, e não apenas como uma medida paliativa (OLIVEIRA, 2015).

## **2.2. Biomassa**

Biomassa pode ser definida como toda a matéria orgânica vegetal formada por meio do armazenamento da energia proveniente da fotossíntese. Nesse processo, parte da luz solar incidente na superfície terrestre é então armazenada na forma de energia química, como ligações moleculares orgânicas. Tal energia pode ser liberada por processos biológicos ou termoquímicos (SOUZA; SORDI; OLIVA, 2002). Ainda, do ponto de vista energético, biomassa pode ser considerada todo recurso renovável proveniente de matéria orgânica, de origem vegetal ou animal, que pode ser utilizada na geração de energia (ANEEL, 2005).

Um aspecto muito interessante dessa fonte energética se dá ao fato dela poder ter sua origem de cultivos agrícolas, como do bagaço de cana, palha de arroz, além de restos em serrarias e casca de árvores na indústria de papel e celulose. Ademais, a capacidade energética através combustão da biomassa em pequenos fornos fornece a possibilidade de sua utilização em lugares remotos como uma forma sustentável de geração energética (CGEE, 2001; BRUN 2012).

A biomassa possui grande versatilidade, uma vez que ela pode ser queimada para a geração de calor ou eletricidade, ou ainda ser convertida em combustíveis líquidos, sólidos ou gasosos por meio de diversos processos físicos, químicos e biológicos (CIESLINSKI, 2014). Com essas transformações, a biomassa sólida e volumosa com baixa concentração energética, pode ser transformada em combustíveis com uma maior densidade energética, permitindo a viabilidade econômica de seu armazenamento e transporte (AÇMA, 2003).

Mesmo produzindo dióxido de carbono durante a combustão, a biomassa oferece benefícios ao meio ambiente, uma vez que, durante seu crescimento, ela absorve dióxido de carbono presente na atmosfera para a síntese de compostos orgânicos (AÇMA, 2003). Isso faz da biomassa uma fonte energética promissora como alternativa de geração de energia em

substituição aos combustíveis fósseis. O desenvolvimento de tecnologias para seu aproveitamento faz dela uma opção energética em destaque, não só curto como no longo prazo, tendo em vista que ela traz consigo níveis de emissão de carbono baixos ou quase nulos (CIESLINSKI, 2014).

Como vantagem, além das baixas emissões de CO<sub>2</sub> como citado anteriormente, a biomassa apresenta baixos teores de enxofre e nitrogênio, o que minimiza as emissões de seus óxidos, SO<sub>x</sub> e NO<sub>x</sub>. Particulados, CO e C<sub>x</sub>H<sub>x</sub> também aparecem em teores reduzidos, o que ajuda a evitar impacto da fotoquímica na atmosfera. Sua utilização para a geração de energia contribui socialmente, apoiando a agricultura local, evitando o despovoamento de zonas rurais e gerando empregos (GARCÍA, 2012; DAL-BÓ, 2016).

Apesar de ter sido durante muito tempo a fonte energética mais utilizada, a biomassa perdeu seu posto para as fontes fósseis não renováveis, sucumbida pelo carvão mineral e posteriormente pelo petróleo e gás natural, sendo sua utilização limitada praticamente às residências em regiões agrícolas (CIESLINSKI, 2014).

As inúmeras vantagens apresentadas pela biomassa no viés econômico, social e ambiental, faz a necessidade de estudos para verificar sua potencialidade energética. Nesse sentido, o Brasil apresenta grande potencial na produção de energia renovável por meio da biomassa, tendo em vista que é um país rico na produção de commodities agrícolas, com um amplo ambiente de oportunidades a serem exploradas. Milhares de toneladas de resíduos de produtos agrícolas podem deixar de ser desperdiçados e passarem a receber uma nova finalidade (MIRANDA; LOPES; MARTINS, 2019). Existem inúmeras matérias-primas a serem exploradas como biomassa geradora de energia, sendo o bagaço de cana-de-açúcar uma em destaque, devido ao seu elevado volume produzido (MILLES, 2008).

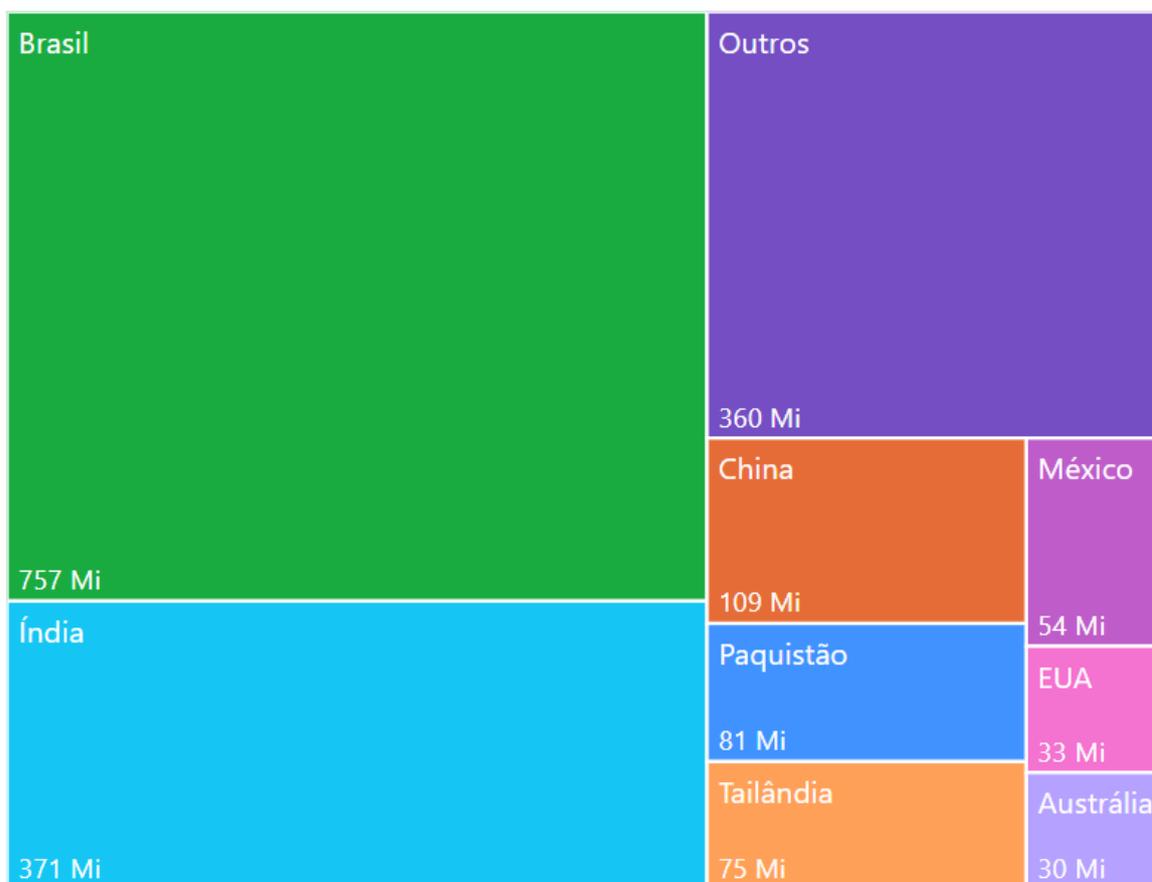
### **2.3. Cana-de-açúcar**

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é classificada como uma gramínea de característica semiperene (MATSUOKA; STOLF, 2012). Acredita-se que ela seja originária da Nova Guiné, considerada uma cultura antiga, que remonta a 2500 a.C., como planta de jardim. É muito cultivada em regiões tropicais e subtropicais, apresentando altas taxas de fotossíntese líquida e eficiência na utilização de nitrogênio e energia solar, o que a torna uma das culturas mais produtivas (PAES et al., 1996; AL-KHAYRI; JAIN; JOHNSON, 2015).

Durante o início da colonização, a cana-de-açúcar já foi introduzida no Brasil, com a chegada dos primeiros exemplares vindos da Ilha da Madeira (Portugal) em 1515. Anos depois, em 1532, fora construído o primeiro engenho para processamento da cana, na capitania de São Vicente. Desde então, essa cultura faz parte da história do nosso país, destacando-se por um dos principais produtos agrícolas do Brasil até os dias de hoje (BARBOSA, 2018).

Segundo a FAO - *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (2021), desde 1980 o Brasil se tornou o maior produtor de cana-de-açúcar, quando ultrapassou a produção da Índia. No ano de 2020, o Brasil produziu mais de 750 milhões de toneladas, responsável por 40,5% de toda a produção mundial de cana-de-açúcar, mais que o dobro da Índia, o segundo maior produtor, com 19,8% da produção, conforme pode ser observado na Figura 2.6.

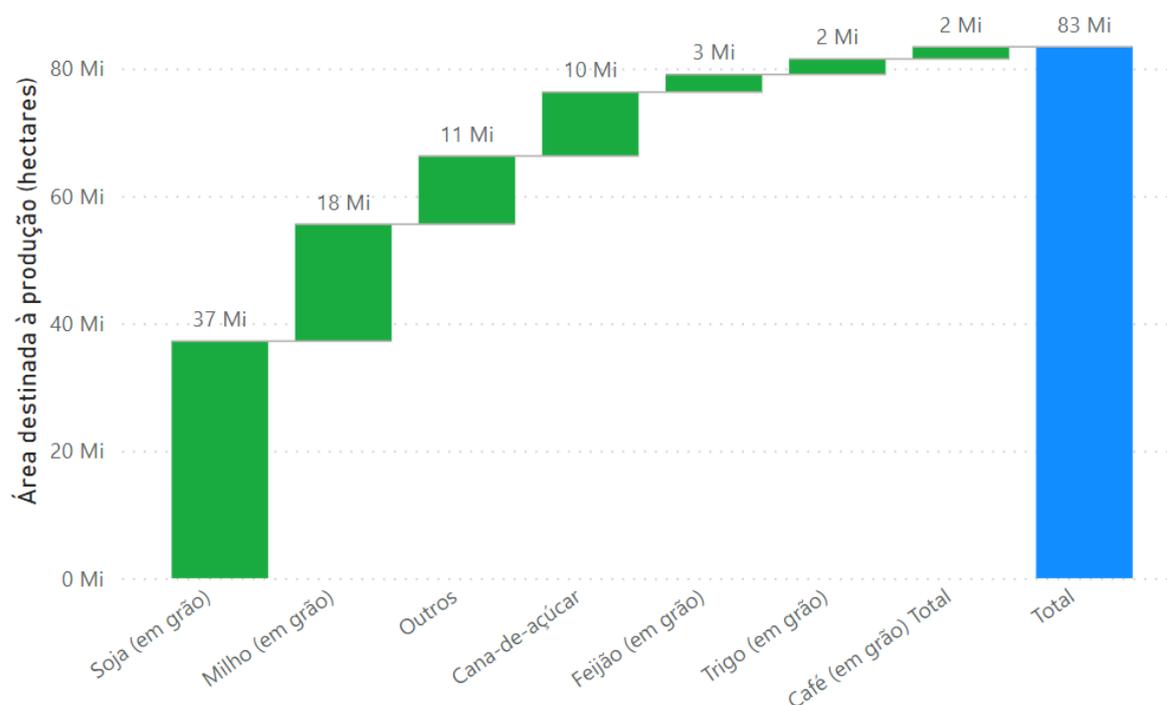
Figura 2.6. Participação na produção mundial de cana-de-açúcar (milhões de toneladas).



Fonte: Adaptado de FAO, 2021.

No Brasil, o plantio de cana-de-açúcar representou 12% de toda a área destinada à produção agrícola em 2020, o que corresponde a mais de 10 milhões de hectares, ficando atrás apenas da soja e do milho (Figura 2.7). Entretanto, ao se observar a quantidade produzida no ano de 2020, a cana-de-açúcar lidera incontestavelmente, com 69,3% de toda a produção agrícola, conforme dados da Produção Agrícola Municipal – IBGE (2021). Na Tabela 2.1 pode ser visualizado a área destinada a produção, produção e rendimento médio das principais culturas do Brasil no ano de 2020, destacando-se o elevado rendimento apresentado cana-de-açúcar.

Figura 2.7. Área destinada à produção por produto (milhões de hectares).



Fonte: Adaptado de IBGE – Produção Agrícola Municipal, 2021.

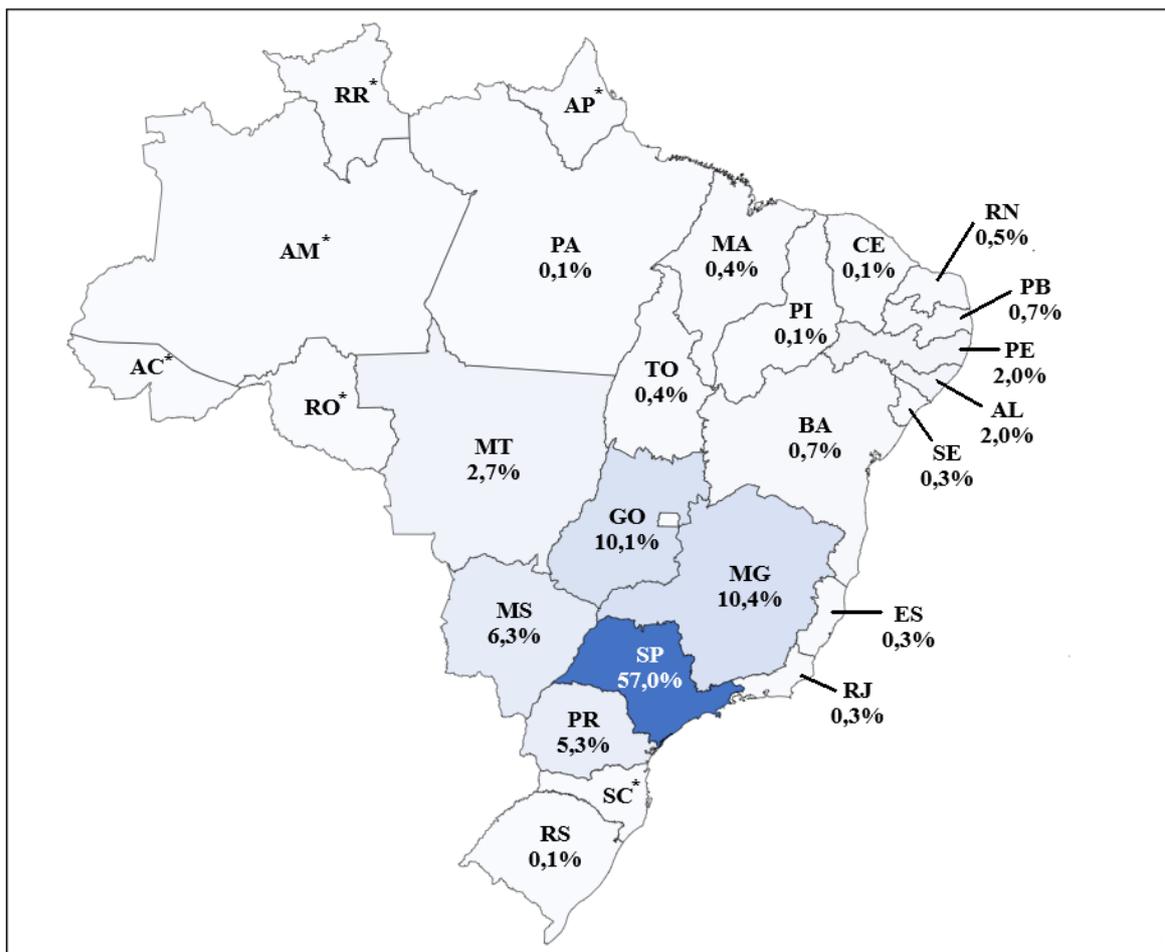
Tabela 2.1. Área, produção e rendimento médio das principais culturas no Brasil em 2020.

Produto	Área (mi ha)	Produção (mi t)	Rendimento (t/ha)
<b>Cana-de-açúcar</b>	10,03	757,12	75604
<b>Soja (em grãos)</b>	37,20	121,80	3275
<b>Milho (em grão)</b>	18,35	103,96	5695
<b>Feijão (em grãos)</b>	2,77	3,04	1130
<b>Trigo (em grãos)</b>	2,44	6,35	2607

Fonte: Adaptado de IBGE – Produção Agrícola Municipal, 2021.

O estado de São Paulo destaca-se na produção de cana-de-açúcar, sendo responsável por mais da metade de toda a produção brasileira, ou ainda, por aproximadamente 23% da produção mundial (IBGE, 2021; FAO, 2021). A representação da produção nacional por estado pode ser observada na Figura 2.8.

Figura 2.8. Participação da produção nacional de cana-de-açúcar, por estado.



\*Estados com produção menor que 0,05% da produção nacional.

**Fonte:** Adaptado de IBGE – Produção Agrícola Municipal, 2021.

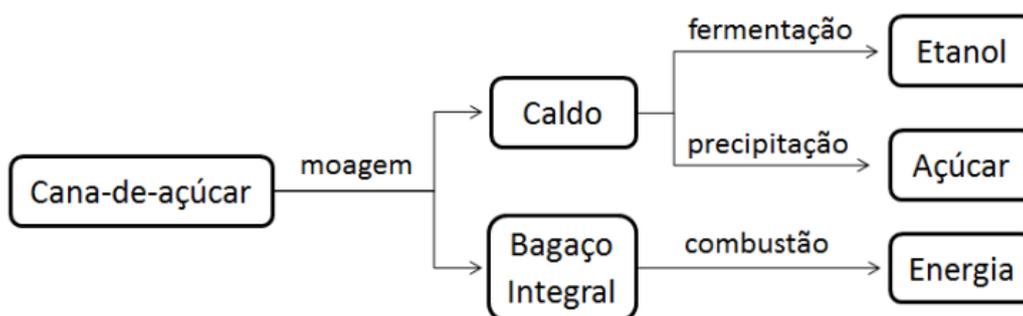
O setor sucroalcooleiro conta com elevados incentivos e investimentos em pesquisa e tecnologia, com uma produtividade maximizada com a mecanização. Dentre os produtos dessa indústria estão, principalmente, o açúcar, o etanol e a energia proveniente da queima do bagaço (GODOY, 2013). Essa variedade de produtos torna esse setor perene, visto que, no ano de 2020, a pandemia de Covid-19 levou à redução do consumo de combustíveis, o

que acarretou a diminuição na produção de etanol. Todavia, no mesmo período houve aumento das cotações internacionais do açúcar, o que fez com que o Brasil batesse recordes nas exportações de açúcar (EPE, 2020).

A cana-de-açúcar colhida passa por diversas análises, entre as quais está a análise do teor de sacarose, que serve como parâmetro para o pagamento aos fornecedores. Dessa forma, o pagamento é realizado tendo por base o ATR, açúcar total recuperável, e não apenas a quantidade de cana-de-açúcar, fator que contribuiu para a qualidade da matéria-prima (IBGE, 2017).

Após chegar à unidade de processamento, a cana passa por uma etapa de limpeza com água (quando colhida manualmente) ou jato de ar (em caso de colheita mecânica), onde são retiradas impurezas que podem contaminar o caldo ou danificar equipamentos. A cana higienizada passa pelo desfibrador, equipamento que tem como função aumentar a produtividade e possui baixo consumo elétrico, preparando a matéria-prima para a moagem. Nesta etapa o caldo é extraído e separado do bagaço (PINHEIRO, 2015). A Figura 2.9 representa o fluxograma simplificado do processo produtivo de açúcar e álcool.

Figura 2.9. Fluxograma simplificado da produção de açúcar e etanol.



Fonte: Novo, 2016.

O caldo de cana, composto basicamente por água (de 80 a 85%) e sacarose (10 a 19%), segue seu processo produtivo, de onde podem ser obtidos o açúcar, por meio da evaporação, cozimento e cristalização, e o etanol, por meio da fermentação e destilação. Além desses produtos a indústria sucroalcooleira produz um subproduto: o bagaço. Durante

muitos anos ele não possuía um destino apropriado, mas recentemente adquiriu importância como combustível para as caldeiras (NUNES; FINZER, 2018; COPERSUCAR, 2018).

As usinas de cana utilizavam lenha e óleo combustível, além da compra de energia elétrica, enquanto desperdiçava grande parte da energia proveniente da cana, presente em seu bagaço. Atualmente, esse subproduto adquiriu importância econômica, tendo em vista sua capacidade de produzir energia por meio da combustão e sua elevada abundância nas usinas sucroalcooleiras (GEBRIN et al., 2020). Essa energia, não só tornou as usinas autossuficientes como também se tornou um produto da indústria sucroalcooleira, sendo o seu excedente vendido e enviado à rede de energia elétrica nacional (INEE, 2021).

De acordo com a UNICA - União da Indústria de Cana-de-Açúcar (2021), a bioeletricidade gerada pela cana-de-açúcar já é a 4ª fonte mais importante da matriz energética nacional. Foram gerados 22,6 mil GWH em 2020, o que corresponde a 82% de toda a energia elétrica gerada por biomassa. O potencial técnico para a produção de energia é de 148 mil GWH, considerando o aproveitamento pleno de toda a biomassa presente nos canaviais, ou seja, atualmente apenas 15% do potencial é aproveitado.

Além dos benefícios da energia proveniente da cana, como a geração de empregos, investimentos e a redução da emissão de GEE, a posição geográfica das usinas e o período da safra são pontos positivos que viabilizam a cogeração de energia elétrica. Uma vez que as usinas estão situadas próximas ao maior centro consumidor de energia e a safra da cana-de-açúcar coincide com o período de seca, o que poupa os reservatórios das hidrelétricas (PELLEGRINI, 2002).

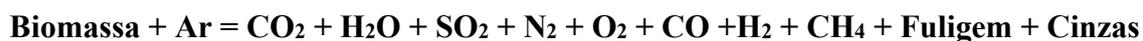
Enquanto a cadeia produtiva do petróleo e as hidrelétricas apresentam seus desafios ambientais e tecnológicos, a cana-de-açúcar apresenta oportunidades para um maior aproveitamento energético, agregação de valor e redução nos efeitos ambientais (INEE, 2021). Com base no vasto volume produzido, cerca de 28% de toda a cana processada, e sua disponibilidade durante o ano todo, estudos direcionados à combustão do bagaço de cana-de-açúcar, que ocorre nas caldeiras, se faz necessário para uma maior eficiência do processo (GEBRIN et al., 2020).

## 2.4. Combustão

Existem duas diferentes tecnologias para a conversão de biomassa em energia útil, por processos bioquímicos ou termoquímicos. No primeiro utiliza-se de bactérias para a produção de combustível, como o biogás que é liberado da decomposição de compostos orgânicos por bactérias, ou o etanol, produto da fermentação de materiais orgânicos. Já os processos termoquímicos, calor é usado, seja por um meio indireto, convertendo a biomassa em um produto intermediário (líquido, gás ou carvão), ou pela combustão direta do material. Os processos indiretos são liquefação, gaseificação e pirólise (KLASON, 2006).

A combustão representa a maneira “mais simples” e direta da conversão da biomassa, onde, a energia das ligações químicas é liberada na forma de calor. Sua utilização ainda pode estar diretamente ligada à produção de eletricidade, por meio do uso de caldeiras e turbinas a gás (KLASON, 2006; ARAÚJO, 2008).

Conforme Nogueira (2000), a reação de combustão pode ser expressa, de maneira generalizada, pelo esquema abaixo:



A biomassa apresenta baixos teores de enxofre, assim, a quantidade de  $\text{SO}_2$  produzida é extremamente pequena, considerada desprezível. A diferença entre cinzas e fuligem está no fato de que, enquanto a fuligem é o produto sólido da combustão incompleta, as cinzas representam a parte sólida mineral não combustível da biomassa (OLIVEIRA, 2006).

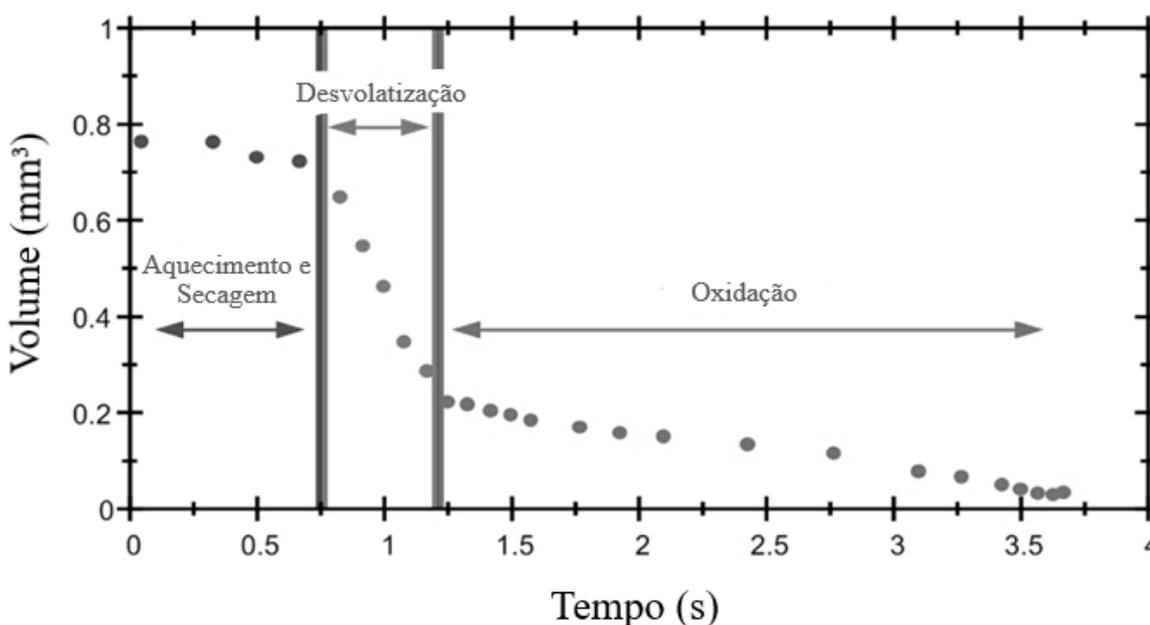
Mesmo existindo diversas tecnologias disponíveis para a combustão da biomassa, segundo Abreu, Oliveira e Guerra (2010), o princípio do processo é o mesmo para todos, dividindo-se em três etapas principais:

- I. Secagem: também chamada de preaquecimento, nessa etapa, que ocorre a temperatura em torno de  $100^\circ\text{C}$ , a umidade presente no material é expulsa por meio da evaporação, sem a presença de chamas;
- II. Pirólise: quando a biomassa seca é aquecida a temperaturas entre  $200^\circ\text{C}$  e  $350^\circ\text{C}$  compostos começam a se decompor, e esses gases voláteis liberados queimam ao se misturarem com o oxigênio, produzindo uma chama amarela. Essa chama não incide diretamente no combustível, mas próximo à sua superfície. Quando todos os compostos voláteis são queimados, resta-se o carvão. Esse processo é

autossustentável, tendo em vista que o calor liberado dos gases da combustão é suficiente para secar o combustível fresco com a liberação de mais voláteis;

- III. Oxidação: o carvão é oxidado, em temperaturas próximas a 800°C. Nessa etapa ocorre a combustão em brasas, onde o carvão é consumido e há intensa liberação de calor, mas quase sem a presença de chamas e fumaça. Dessa maneira, oxigênio deve ser inserido, assim como na pirólise, se misturando ao monóxido de carbono para a formação de dióxido de carbono, o qual é liberado para a atmosfera. Ao fim, restam-se as cinzas.

Figura 2.10. Combustão de uma pequena partícula de biomassa, representando as diferentes etapas.



Fonte: Adaptado de Loo e Koppejan, 2008.

A combustão pode ser feita tanto em batelada quanto de maneira contínua, e a adição pode ser de maneira forçada ou por ventilação natural. O processo em batelada é utilizado para unidades de combustão de pequena escala, as quais também podem utilizar da ventilação natural. Unidades de média e grande escala sempre se utilizam do processo contínuo com a adição forçada de ar (LOO; KOPPEJAN, 2008).

Diferentes características e composições das biomassas podem influenciar a sua combustão. De maneira geral, o uso da biomassa com elevados teores de umidades e/ou

cinzas pode ocasionar problemas com a ignição ou eficiência da combustão, por exemplo. Como as propriedades físicas da biomassa são muito amplas, se faz necessário a caracterização das propriedades que podem influenciar o comportamento do material combustível (ARAÚJO, 2008).

## 2.5. Caracterização de biomassa

O potencial energético de um combustível depende de suas propriedades, sejam elas composição elementar, densidade, granulometria, teor de cinzas, teor de voláteis, umidade, as quais inferem no poder calorífico da biomassa. Ou seja, a composição e estrutura da biomassa influenciam direto no processo de conversão da biomassa em energia (EMBRAPA, 2016).

A caracterização da biomassa deve ser feita de acordo com sua aplicação, buscando entender as propriedades determinantes, particulares para cada finalidade (SÁNCHEZ, 2010).

### 2.5.1. Massa específica

A massa específica é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume. Ela relaciona a massa contínua da biomassa com o volume que ela ocupa, excluindo os poros permeáveis. Esse conceito só é aplicável para materiais contínuos, o que não representa resíduos de biomassa. Já a massa específica aparente é definida pela relação entre a massa do agregado seco e seu volume, incluindo os poros permeáveis, conforme a Equação 2.1 (BARRETO, 2008; CONTECH, 2018).

$$\rho_{ap} = \frac{m_{bio}}{V} \quad (2.1)$$

onde  $m_{bio}$  representa a massa de biomassa seca e  $V$  o volume que ela ocupa, incluindo seus poros permeáveis.

### 2.5.2. Granulometria

O conhecimento do tamanho de partícula é de suma importância para diversos processos, pois impacta diretamente na taxa de degradação do material e, conseqüente liberação de vapores, bem como para a fluidização do material, evitando segregação de partículas no leito ou o seu arraste. Quanto menores as dimensões das partículas, maiores serão as taxas de degradação, pela maximização da transferência de calor, reduzindo assim o tempo de residência do material e a ocorrência de reações secundárias (JORDAN et al., 2016).

A determinação da distribuição dos tamanhos de partículas sólidas é um processo que pode ser realizado por três diferentes métodos, a microscopia eletrônica, o método físico de sedimentação e a análise por peneiras padronizadas. O último consiste no mais utilizado, tendo em vista a facilidade e resultados satisfatórios (CORTEZ; LORA; OLIVARES, 2008).

A definição do diâmetro médio de partícula vem do conhecimento da distribuição granulométrica de determinada amostra, que pode ser representada pelo diâmetro médio de Sauter ( $d_{pS}$ ). Ele é muito utilizado em sistemas particulados, transferência de calor e massa, e pode ser calculado conforme Equação 2.2 (CREMASCO, 2012).

$$d_{pS} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i}{D_i} \right)} \quad (2.2)$$

em que:  $x_i$  representa a fração mássica da partícula retida na peneira  $i$  e  $D_i$  o diâmetro médio das peneiras  $i$  e  $i - 1$ .

### 2.5.3. Análise imediata

A análise imediata quantifica o percentual de umidade, materiais voláteis, carbono fixo e cinzas presentes na amostra de biomassa (OLIVEIRA, 2006).

Valores obtidos de diferentes referências para a análise imediata de bagaço de cana-de-açúcar e biomassas semelhantes podem ser observados na Tabela 2.2. Verifica-se divergências entre os valores apresentados por diferentes autores para uma mesma biomassa,

isso pode ocorrer devido às condições climáticas, diferença no solo, variedade da cultura e manejo do material.

Tabela 2.2. Análise imediata do bagaço de cana-de-açúcar e biomassas semelhantes.

Biomassa	Umidade (% b.u.)	Teor de Voláteis (% b.s.)	Teor de Cinzas (% b.s.)	Teor de Carbono Fixo (% b.s.)
Bagaço de cana-de-açúcar	51,01 <sup>a</sup>	83,66 <sup>a</sup>	3,20 <sup>a</sup>	13,15 <sup>a</sup>
	10,50 <sup>b</sup>	66,40 <sup>b</sup>	18,80 <sup>b</sup>	14,80 <sup>b</sup>
Casca de Café	17,20 <sup>b</sup>	73,06 <sup>b</sup>	6,50 <sup>b</sup>	19,90 <sup>b</sup>
	82,37 <sup>c</sup>	77,21 <sup>c</sup>	7,73 <sup>c</sup>	15,06 <sup>c</sup>
Casca de Arroz	8,47 <sup>a</sup>	16,95 <sup>a</sup>	21,24 <sup>a</sup>	61,81 <sup>a</sup>
	11,60 <sup>b</sup>	64,20 <sup>b</sup>	20,60 <sup>b</sup>	15,20 <sup>b</sup>
Cavaco de Eucalipto	12,90 <sup>d</sup>	84,20 <sup>d</sup>	0,60 <sup>d</sup>	15,20 <sup>d</sup>
	12,30 <sup>b</sup>	79,76 <sup>b</sup>	0,15 <sup>b</sup>	20,10 <sup>b</sup>

**Fonte:** Adaptado de <sup>a</sup>Chaniwala e Parikh (2002); <sup>b</sup>Cieslinski (2014); <sup>c</sup>Dal-Bó (2015); <sup>d</sup>Sánchez (2010).

### 2.5.3.1. Umidade

A umidade representa fração de água presente no material, podendo ser tanto expressa em base úmida quanto em base seca. Ela pode ser facilmente calculada pela diferença de massas entre o material úmido e seco, conforme as Equações 2.3 e 2.4 (DAL-BÓ, 2016).

$$X_{bu} = \frac{m_{H_2O}}{m_{H_2O} + m_{ms}} \quad (2.3)$$

$$X_{bs} = \frac{m_{H_2O}}{m_{ms}} \quad (2.4)$$

onde:  $X_{bu}$  e  $X_{bs}$  representam o teor de umidade em base úmida e base seca, respectivamente,  $m_{H_2O}$  a massa de água (dada pela diferença da massa inicial e da massa de material seco) e  $m_{ms}$  a massa de material seco.

O poder calorífico de um combustível é inversamente proporcional a umidade, pois quanto maior o conteúdo de água, mais calor será necessário para evaporá-la, absorvendo

assim parte da energia do processo de combustão. Além de dificultar a ignição e queima da biomassa, a umidade aumenta os produtos indesejáveis do processo, como gases poluentes e material particulado (CIESLINSK, 2014).

### 2.5.3.2. Teor de voláteis ( $T_V$ )

Os voláteis representam a parte da biomassa, incluindo a umidade, que evapora como gás durante o processo de aquecimento. Pode ser determinado por meio da quantificação da fração de amostra, previamente seca, restante após o processo de aquecimento em atmosfera inerte, conforme Equação 2.5 (BARRETO, 2008).

$$T_V = \frac{m_{ms} - m_{mr}}{m_{ms}} \quad (2.5)$$

em que: e  $m_{ms}$  é a massa de material seco e  $m_{mr}$  é a massa de material restante após o aquecimento.

O material volátil interfere no processo de combustão, tendo um importante papel no início do processo durante a ignição e influenciando diretamente no perfil de escoamento gasoso. Quanto maior o teor de materiais voláteis, maior será a velocidade de queima e menor a estabilidade da chama (CIESLINSK, 2014).

### 2.5.3.3. Teor de cinzas ( $T_{Cin}$ )

As cinzas são os resíduos resultantes da combustão de compostos orgânicos e oxidações dos inorgânicos. Ou seja, as cinzas são produtos da combustão, sendo seu estudo necessário para evitar que elas atrapalhem as operações.

Quando em altas concentrações, as cinzas podem reduzir o poder calorífico do combustível, causar a perda de energia e ainda influenciar no processo de transferência de calor, o que faz a sua remoção necessária (KLAUTAU, 2008). As cinzas podem atacar os refratários ou se alojar em seus poros, provocando rachaduras. Ainda, se temperaturas muito elevadas, maiores que o ponto de amolecimento e fusão das cinzas forem atingidas, elas podem ocasionar no acúmulo de material, inviabilizando a continuidade do processo.

Mediante a tais fatos, o conhecimento do teor de cinzas permite avaliar melhor o comportamento, evitando posteriores problemas operacionais (VIEIRA, 2012).

Sua origem pode ser de materiais metálicos presentes no combustível, além de argila, areia e sais presentes na biomassa, assim como solos misturados durante sua colheita e manuseio (VIEIRA, 2012). Seu cálculo é dado pela Equação 2.6, necessariamente expresso em base seca (BARRETO, 2008).

$$T_{cin} = \frac{m_{cin}}{m_{ms}} \quad (2.6)$$

sendo  $m_{cin}$  a massa de cinzas contida no material.

#### 2.5.3.4. Teor de carbono fixo ( $T_{CF}$ )

Representa a massa de carbono presente após a liberação de todos os materiais voláteis, excluindo a umidade e as cinzas. Embora seja majoritariamente composto por carbono, pode conter outros elementos não liberados durante a volatilização (MCKENDRY, 2002). O teor de carbono fixo pode ser facilmente calculado a partir dos teores de voláteis e cinzas, conforme Equação 2.7.

$$T_{CF} = 100 - (T_V + T_{cin}) \quad (2.7)$$

#### 2.5.4. Poder calorífico (PC)

O poder calorífico é uma das principais características ao se escolher um combustível, pois indica a quantidade de energia liberada na forma de calor durante o processo de combustão completa. Ele é expresso em termos da energia por quantidade de massa, geralmente em KJ/kg (JENKINS, 1998).

Como o teor de umidade interfere de forma expressiva nessa propriedade, ela se divide em duas: poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI). O PCS representa a quantidade máxima de energia que pode ser obtida da transferência de calor do combustível, considerando a água formada na combustão no estado líquido. Já o PCI fornece

a quantidade de calor liberado num processo de combustão sendo que a água está no estado vapor, ou seja, parte da energia foi utilizada para evaporar a água (VIEIRA, 2012; CIESLINSKI, 2014).

A diferença entre o PCS e o PCI se resume a energia requerida para evaporar a umidade presente no material, bem como a água formada durante a reação de combustão. O poder calorífico superior ou inferior é a propriedade físico-química mais importante na escolha de uma determinada biomassa para um processo termoquímico (VIEIRA, 2012).

O PCS pode ser determinado por bomba calorimétrica ou calculado por meio de correlações existentes que utilizam de valores das análises elementares ou imediata. Já o PCI só pode ser calculado conhecendo-se o PCS do combustível e a sua relação entre átomos de hidrogênio-carbono (H/C) (DAL-BÓ, 2016).

Parikh, Channiwala e Ghosal (2005) apresentaram correlação para estimar o PCS de biomassas por meio de dados de análise imediata, conforme expresso na Equação 2.8.

$$PCS \left[ \frac{MJ}{kg} \right] = 0,3536 T_{CF} + 0,1559 T_V - 0,0078 T_{cin} \quad (2.8)$$

Valores para poderes caloríficos do bagaço de cana e biomassas semelhantes estão representados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3. Valores do Poder Calorífico Superior para o bagaço de cana e biomassas semelhantes.

<b>Biomassa</b>	<b>PCS (MJ/kg)</b>	<b>Referência</b>
Bagaço de cana-de-açúcar	18,73	Channiwala e Parikh (2002)
	15,96	Cieslinski (2014)
Casca de café	18,61	Cieslinski (2010)
	17,30	Dal-Bó (2015)
Casca de arroz	14,69	Channiwala e Parikh (2002)
	14,34	Cieslinski (2014)
Cavaco de eucalipto	18,00	Sánchez (2010)
	19,82	Cieslinski (2014)

### **2.5.5. Análise termogravimétrica**

De acordo com Denari e Cavalheiro (2012), a análise termogravimétrica (TGA) é a técnica termoanalítica que acompanha o ganho e/ou a perda de massa de uma amostra em função do tempo ou temperatura. Ainda, a termogravimetria derivada (DTG) representa a derivada da variação de massa em função do tempo ( $dm/dt$ ), registrada em função da temperatura ou tempo. A DTG nada mais é que um arranjo matemático, sendo a primeira derivada da TGA.

Por meio desse processo é possível acompanhar os efeitos de calor associados as alterações físicas da amostra, como transições de fase, reações de desidratação, decomposição, entre outras, capazes de causar variação de calor. A análise termogravimétrica pode ser utilizada para análise e caracterização dos mais distintos materiais, fornecendo informações sobre os patamares das degradações (IONASHIRO, 2004).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

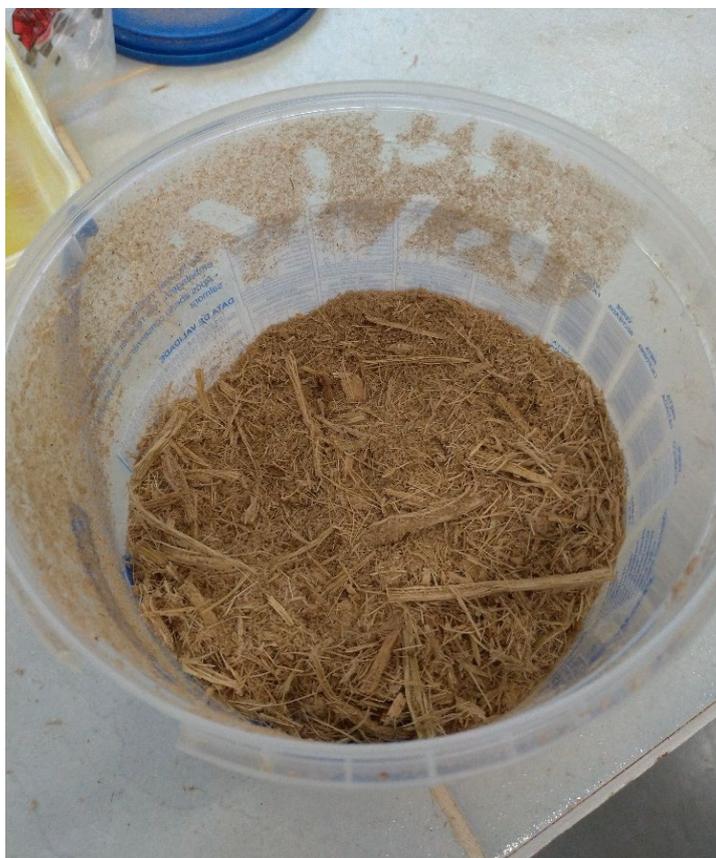
#### 3.1. Matéria-Prima

O bagaço de cana-de-açúcar utilizado para realização dos experimentos, mostrado na Figura 3.1, foi coletado em lote único, no mês de maio de 2019, cedido pela Usina São Martinho, unidade de Pradópolis - SP. Ele foi armazenado em sacos herméticos de polietileno do tipo *Zip Lock*, e conservado sob refrigeração a 5 °C.

Antes da realização dos experimentos, o material era retirado do refrigerador e deixado em repouso durante 30 minutos, para que ele entrasse em equilíbrio com a temperatura ambiente.

Todos os experimentos foram realizados no ano de 2019, no Laboratório de Centro de Secagem de Pastas, Sementes e Suspensões do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, durante a disciplina de Desenvolvimento de Processos Químicos.

Figura 3.1. Amostragem do bagaço de cana-de-açúcar utilizado nos experimentos.



Fonte: O Autor.

## 3.2. Caracterização da Biomassa

### 3.2.1. Massa específica aparente

O procedimento para aferição da massa específica do bagaço foi realizado por meio do método de picnometria com hexano. O picnômetro foi calibrado com o solvente utilizado, anotando-se a massa e a temperatura. Após seco e pesado, o picnômetro foi preenchido até um terço de seu volume com a amostra de biomassa, sendo novamente pesado e então preenchido com hexano. A amostra foi deixada em solução com o solvente durante sete dias, até que atingissem o ponto de saturação, sendo então o volume do picnômetro preenchido com hexano, e o conjunto todo pesado, sempre com a aferição da temperatura. Com o volume do picnômetro calibrado, as massas de bagaço e de hexano, além da massa específica deste na temperatura ambiente, foi possível determinar a massa específica aparente da amostra. Esse procedimento foi realizado em triplicata.

### 3.2.2. Granulometria

O experimento de análise granulométrica foi feito pelo método de análise por peneiras padronizadas, onde as peneiras utilizadas estão mostradas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Série Tyler e abertura das peneiras utilizadas.

Denominação Tyler	Abertura em mm
6	3,360
12	1,680
20	0,841
28	0,595
35	0,400
48	0,297
Fundo	< 0,297

Fonte: O autor.

Inicialmente foi colocada uma massa de 100g de amostra para realização do experimento, entretanto verificou-se que tal massa preenchia totalmente a peneira de maior abertura o que não possibilitava a passagem das partículas menores. Dessa forma, a massa

de material utilizada foi a suficiente para se preencher o fundo da peneira de maior abertura, e, já com todas as peneiras acopladas, utilizou-se de um agitador mecânico, onde a amostra ficou sob agitação durante 10 minutos, sendo o procedimento realizado em duplicata.

Tabela 3.2. Modelos para distribuição granulométrica.

Modelo	Equacionamento	$d_{ps}$
GGG	$X_i = \left(\frac{D_i}{k}\right)^m$ sendo: $D_i \leq k; m > 0; k = D_{100}$ $m = 1$ (distribuição uniforme) $m \neq 1$ (casos usuais)	$d_{ps} = k \left(\frac{m-1}{m}\right)$ válido para $m > 1$
RRB	$X_i = 1 - \exp \left[ -\left(\frac{D_i}{D'}\right)^n \right]$ $n > 0; D' = D_{63,2}$	$d_{ps} = \frac{D'}{\Gamma\left(1 - \frac{1}{n}\right)}$ para $n > 1$ com a função gama: $\Gamma(r) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{r-1} dx$
LN	$X_i = \frac{1}{2} [1 + \text{erf}(Z_i)]$ $Z_i = \frac{\ln\left(\frac{D_i}{D_{50}}\right)}{\sqrt{2} (\ln \sigma)}$ $\text{erf}(Z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^Z \exp(-y^2) dy$ função erro na qual a dispersão $\sigma$ é igual a: $\sigma = \frac{D_{84,1}}{D_{50}} = \frac{D_{50}}{D_{15,9}} \geq 1$	$d_{ps} = D_{50} \exp\left(-\frac{1}{2} \ln^2 \sigma\right)$

**Onde:**  $D_i$  o diâmetro da partícula;  $X_i$  a fração cumulativa das partículas de diâmetro  $D$ ;  $k$  e  $m$  parâmetros do modelo GGS;  $D_{100}$ ,  $D_{63,2}$ ,  $D_{50}$  e  $D_{15,9}$  os diâmetros  $D$  para  $X = 1, X = 0,632, X = 0,5$  e  $D = 0,159$ , respectivamente;  $n$  e  $D'$  parâmetros do modelo RRB;  $\sigma$  o desvio padrão geométrico.

**Fonte:** Cremasco, 2012.

A partir dos dados obtidos foi possível montar as curvas de distribuição de frequência e distribuição cumulativa das partículas. Foi realizado o ajuste para os modelos distribuição granulométrica por regressão não linear, calculando o diâmetro médio de Sauter ( $d_{pS}$ ) para cada modelo, conforme a Tabela 3.2.

Com o modelo que melhor representou a distribuição do bagaço de cana, entre os de Gates, Gaudin e Schumann (GGS), Rosin, Rammler e Bennet (RRB) e o Log-normal (LN), pegou-se o diâmetro médio de Sauter e comparou-o com o obtido pela Equação 2.2.

$$d_{pS} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i}{D_i} \right)} \quad (2.2)$$

### 3.2.3. Análise imediata

Os experimentos de análise imediata, compostos pela determinação do teor de umidade, voláteis, cinzas e de carbono fixo, foram realizados de acordo com a norma E870-82 da *American Society for Testing and Materials* (ASTM E870-82, 2019). Todos os procedimentos foram realizados em triplicatas, conforme descrito a seguir.

#### 3.2.3.1. Umidade

A determinação da umidade do material foi realizada pelo método gravimétrico padrão. Adicionou-se 3g de material em um cadinho seco, previamente pesado. O cadinho com material foi colocado em uma estufa a 105°C durante 24 horas. Após esse período, a amostra foi transferida para um dessecador para seu resfriamento, ela foi pesada, e com as massas calculou-se a umidade do bagaço de cana-de-açúcar conforme Equações 2.3 e 2.4.

$$X_{bu} = \frac{m_{H_2O}}{m_{H_2O} + m_{ms}} \quad (2.3)$$

$$X_{bs} = \frac{m_{H_2O}}{m_{ms}} \quad (2.4)$$

onde  $m_{H_2O}$  foi calculada pela subtração da massa inicial de amostra pela massa de material seco

### 3.2.3.2. Teor de voláteis

Para a determinação do teor de voláteis, colocou-se aproximadamente três gramas de amostra de bagaço de cana-de-açúcar já sem umidade, no cadinho de porcelana, previamente seco em estufa a 105°C. O cadinho foi levado à porta da mufla a 900°C durante três minutos, para aclimatação, e posteriormente foi inserido no interior do forno por mais sete minutos, a uma temperatura de aproximadamente 900°C.

Após esse período, a amostra foi retirada e colocada em um dessecador para ser resfriada até a temperatura ambiente, durante 30 minutos, e então ser pesada para cálculo da massa final e do teor de voláteis conforme Equação 2.5.

$$T_V = \frac{m_{ms} - m_{mr}}{m_{ms}} \quad (2.5)$$

Figura 3.2. Mufla utilizado nos experimentos de teor de voláteis e cinzas.



Fonte: O autor.

### 3.2.3.3. Teor de cinzas

Para a determinação do teor de cinzas, primeiramente calcinou-se o cadinho a aproximadamente 450°C durante 30 minutos, sendo ele então colocado no dessecador para seu resfriamento e posterior pesagem. Após isso, foi colocado em torno de um grama de amostra, já sem umidade e voláteis, no cadinho, que foi levado ao interior de um forno mufla a uma temperatura de 710°C, onde permaneceu durante uma hora. Ao final, restam-se apenas as cinzas. O cadinho foi retirado do forno e colocado em um dessecador, para o resfriamento do material e posterior pesagem. Com isso, o teor de cinzas foi calculado por meio da Equação 2.6.

$$T_{cin} = \frac{m_0 - m_{final}}{m_0} \quad (2.6)$$

onde:  $m_0$  corresponde a massa inicial de amostra e  $m_{final}$  a massa de amostra ao final do experimento.

### 3.2.3.4. Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo foi calculado a partir dos dados de teores de voláteis e cinzas, conforme Equação 2.7.

$$T_{CF} = 1 - (T_V + T_{cin}) \quad (2.7)$$

### 3.2.3.5. Poder calorífico superior

O poder calorífico superior da amostra foi determinado por meio de cálculo, tendo como base os resultados obtidos da análise imediata. Ele foi calculado conforme a Equação 2.8, apresentada por Parikh, Channiwala e Ghosal (2005) para a determinação do PCS de biomassas.

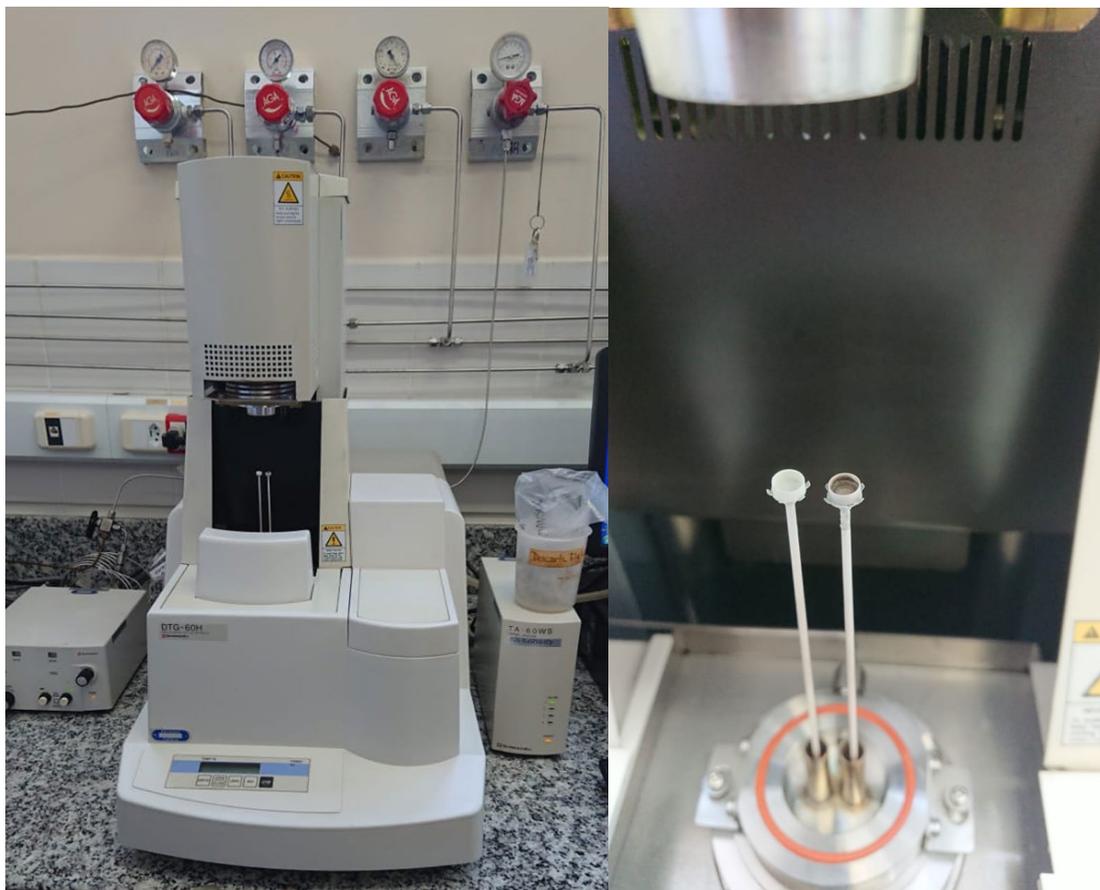
$$PCS \left[ \frac{MJ}{kg} \right] = 0,3536 T_{CF} + 0,1559 T_V - 0,0078 T_{cin} \quad (2.8)$$

### 3.2.4. Análise termogravimétrica

O procedimento de análise termogravimétrica foi realizado em um equipamento da marca Shimadzu, modelo DTG-60H, conforme Figura 3.3. Foi utilizada atmosfera de ar sintético com uma vazão de 50 mL/min e uma taxa de aquecimento de 5°C por minuto, partindo de uma temperatura de 25°C até 1000°C.

O procedimento foi feito para amostra de bagaço de cana-de-açúcar *in natura* e seco em estufa por 24h a 105°C. A massa utilizada de amostra foi o suficiente para preencher o cadinho, cerca de 4mg.

Figura 3.3. Equipamento utilizado para análise termogravimétrica.

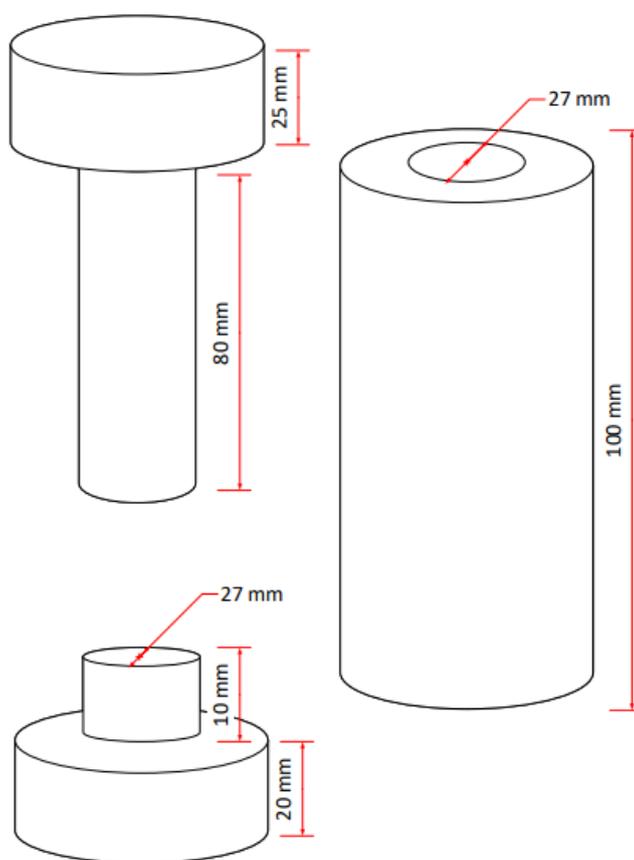


Fonte: O autor.

### 3.2.5. Peletização

O processo de peletização foi realizado com diferentes granulometrias, a fim de se verificar a influência do tamanho de partícula na adesão do material. Foram utilizadas as granulometrias compreendidas entre os *Meshs* -14+16, -16+24 e -24+28, além do material *in natura*. A compactação foi feita em um molde cilíndrico feito em aço inox, com 90 mm de altura e 27 mm de diâmetro, conforme representado na Figura 3.4.

Figura 3.4. Representação do molde utilizado para confecção dos pellets.



Fonte: O Autor.

Para a confecção dos pellets, foram adicionados 12 gramas de material no molde, aplicando-se uma força de seis toneladas por meio de uma prensa hidráulica manual.

### 3.2.6. Combustão

A combustão foi realizada em um forno mufla, onde mediu-se a massa de material durante a queima com o auxílio de um suporte suspenso acoplado a uma balança semianalítica, conforme Figura 3.5. Para esse processo, foi realizado o aquecimento de um pellet a uma taxa de 5°C por minuto, iniciando-se em uma temperatura de 252°C até cerca de 600°C.

Figura 3.5. Sistema utilizado para o processo de combustão.



Fonte: O Autor.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Massa específica aparente

O experimento para a determinação da massa específica aparente do bagaço de cana por picnometria teve como resultado o valor de  $0,839 \pm 0,090 \text{ g/cm}^3$ . Tal desvio apresentado pode ser atribuído a grande heterogeneidade do material, que torna a reprodução da amostra muito difícil, característica típica de material poroso heterogêneo. O valor encontrado na literatura para o bagaço de cana-de-açúcar foi de  $0,635 \text{ g/cm}^3$ , conforme apresentado por Shojaeiarani et al. (2019).

Arranz et al. (2015) estudou os efeitos da densidade aparente nos atributos relacionados à combustão da biomassa. Foi constatado que biomassas com uma maior massa específica aparente apresentavam uma maior densidade energética, conforme esperado. Ainda, a uma umidade constante, a condutividade térmica da biomassa aumentou linearmente com uma maior massa específica aparente, contribuindo para a transferência de calor.

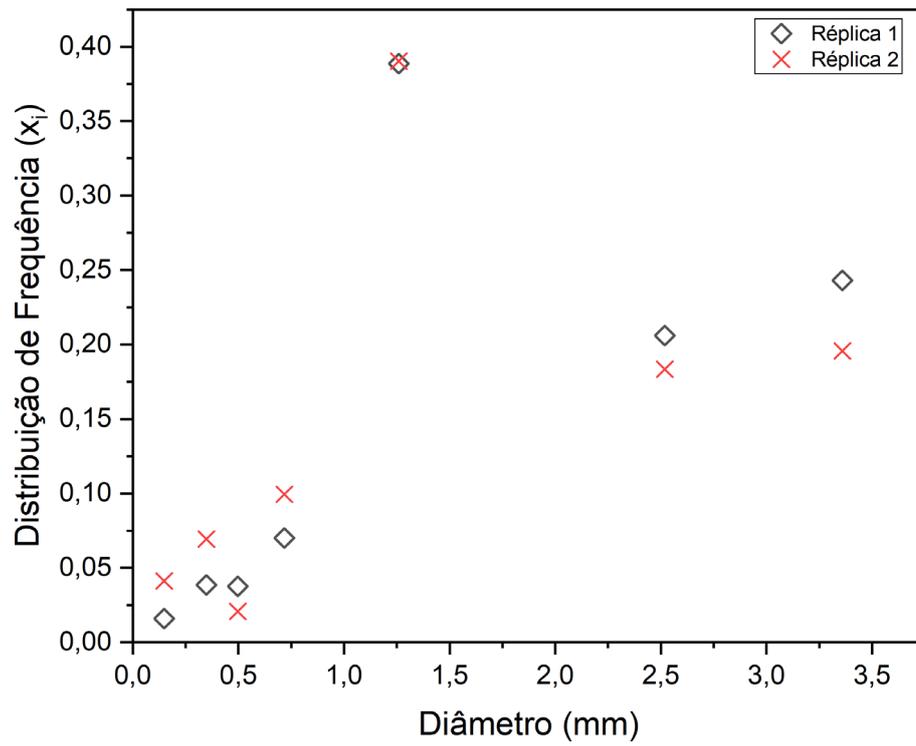
De maneira geral, o conhecimento da massa específica da biomassa é importante, uma vez que interfere diretamente na estocagem e transporte, bem como na alimentação durante o processo de combustão. Além disso, o design do sistema de alimentação depende diretamente desse parâmetro (MOTTA et al., 2018).

### 4.2. Distribuição Granulométrica

As distribuições granulométricas obtidas através do peneiramento estão representadas na Figura 4.1 e Figura 4.2, sendo a primeira a distribuição de frequência e a segunda a distribuição cumulativa, para as duas réplicas realizadas.

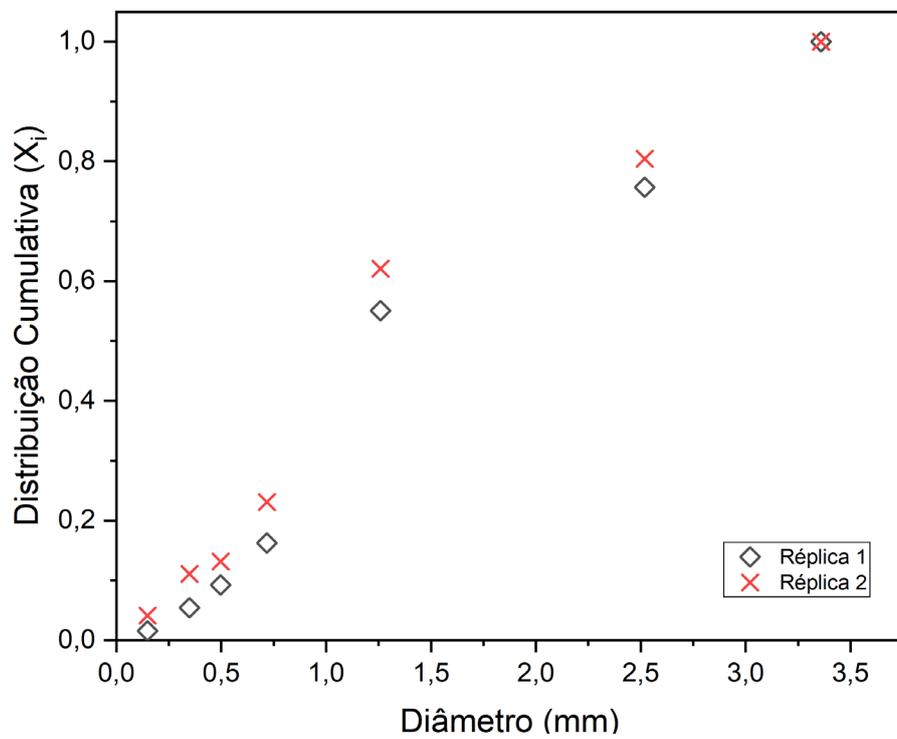
As diferenças das distribuições entre as réplicas apresentadas podem ser justificadas devido ao caráter heterogêneo e irregular no formato do material, dificultando a passagem pelas peneiras. Observa-se que quase 80% das partículas possuem diâmetro médio menor que 2,52 mm (*mesh* -6 +12). Ainda, mais de 60% das partículas apresentam diâmetros menores que 1,5mm, favorecendo a combustão do material. O conhecimento da granulometria do material é importante pois interfere diretamente na zona de combustão, dessa forma, partículas desuniformes provocam uma queima irregular na zona de combustão (COMÉRIO et al., 2016).

Figura 4.1. Distribuição de Frequência.



Fonte: O Autor.

Figura 4.2. Distribuição Cumulativa.



Fonte: O Autor.

Os ajustes para os valores experimentais obtidos foram realizados para os modelos de Gates, Gaudin e Schumann (GGS), Rosin, Rammler e Bennet (RRB) e o Log-normal (LN), sendo os dados obtidos para os parâmetros, bem como o coeficiente de correlação obtido para o ajuste dos modelos representados na Tabela 4.1. O modelo de RRB foi o que melhor se ajustou para os dados, com o maior coeficiente de correlação, de 0,969. O modelo GGS também apresentou bom ajuste ( $R^2 = 0,948$ ), enquanto o modelo LN não se ajustou aos dados experimentais, possuindo um coeficiente de correlação baixo, igual a 0,689.

Tabela 4.1. Valores dos parâmetros e coeficiente de correlação para os modelos aplicados.

<b>Modelo</b>	<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<b>GGS</b>	<i>k</i>	3,265	0,948
	<i>m</i>	0,909	
<b>RRB</b>	<i>D'</i>	1,616	0,969
	<i>n</i>	1,567	
<b>LN</b>	<i>D</i> <sub>50</sub>	0,815	0,689
	$\sigma$	1,431	

**Observação:** *k*, *D'* e *D*<sub>50</sub> [mm]; *m*, *n* e  $\sigma$  [adimensional].

**Fonte:** O Autor.

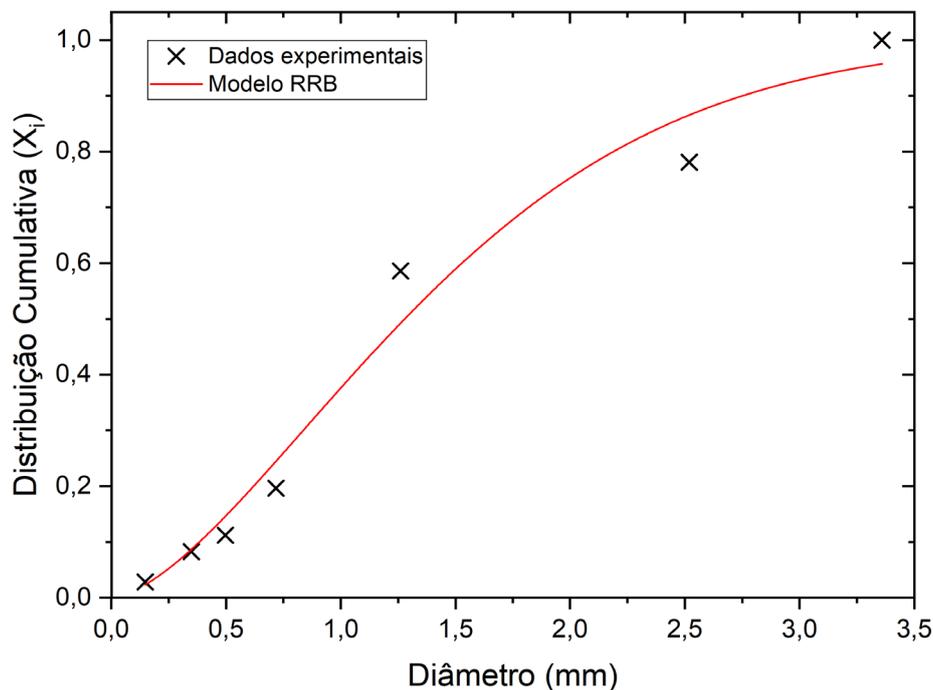
Ao analisar os parâmetros dos modelos utilizados, temos que, para o modelo GGS, *k* corresponde ao valor do diâmetro *D* quando  $X = 1$ . O valor de *k* foi de 3,26 mm, próximo ao experimental, de 3,36 mm. Já para o modelo RRB, o parâmetro *D'* corresponde ao diâmetro quando  $X = 0,632$  (*D*<sub>63,2</sub>) com o valor de 1,62 mm. A partir de uma interpolação linear entre os dados experimentais ( $D = 1,260$ ;  $X = 0,586$  e  $D = 2,520$ ;  $X = 0,781$ ) obteve-se o valor de *D*<sub>63,2</sub> igual a 1,56 mm, próximo ao encontrado pelo parâmetro *D'* do modelo. Já o modelo Log-Normal não apresentou um bom ajuste e seu parâmetro *D*<sub>50</sub>, de 0,82 mm não corresponde ao valor dos dados experimentais obtidos por meio de interpolação linear para  $X = 0,5$ , de 1,14 mm ( $D = 0,718$ ;  $X = 0,196$  e  $D = 1,260$ ;  $X = 0,586$ ).

A expressão da distribuição cumulativa do bagaço de cana estudado obtida por regressão para o modelo de RRB está representada na Equação 4.1.

$$X_i = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{D_i}{1,616} \right)^{1,567} \right] \quad (4.1)$$

A curva apresentada pelo modelo RRB, juntamente com os dados experimentais estão representados na Figura 4.3.

Figura 4.3. Ajuste do modelo de RRB para os dados experimentais.



Fonte: O Autor.

Como o valor do parâmetro  $m$  encontrado para o modelo GGS foi menor do 1, não foi possível calcular o diâmetro médio de Sauter por tal método, pois a equação para cálculo possui validade apenas para  $m > 1$ , uma vez que valores de  $m$  menores do que 1 implicariam em diâmetros negativos. Já para os modelos de RRB e LN calculados foram de 0,66 mm e 0,76 mm, respectivamente, valores um pouco distantes do calculado diretamente pela (2.2, de 1,03 mm. O valor para o diâmetro médio encontrado por Dentello (2015), foi de 0,74 mm. Tal disparidade pode ser atribuída às diferentes peneiras utilizadas e ao processo de moagem, que pode interferir na granulometria do material.

### 4.3. Análise imediata e Poder Calorífico Superior

Os dados obtidos pela análise imediata do bagaço de cana-de-açúcar, e o seu poder calorífico superior calculado estão representados na Tabela 4.2, juntamente com seus respectivos desvios, além de dados obtidos na literatura para fins comparativos.

Os valores obtidos estão dentro da variação encontrada nas diversas referências utilizadas (Tabela 4.2). Tais diferenças podem ser explicadas devido à espécie de cana-de-açúcar, safra, características de solo e variações climáticas, além do armazenamento do bagaço utilizado para a realização dos experimentos.

Tabela 4.2 – Dados de análise imediata e PCS, obtidos experimentalmente e encontrados na literatura.

	<b>Experimental</b>	<b>Literatura</b>	<b>Referência</b>
Umidade [% b.u.]	30,89 ± 0,63	51,0	Channiwala e Parikh (2002)
		6,4	Sánchez (2010)
		44,4	Arantes (2014)
		10,5	Cieslinski (2014)
Voláteis [% b.s.]	91,20 ± 0,88	83,7	Channiwala e Parikh (2002)
		86,4	Sánchez (2010)
		79,3	Arantes (2014)
		66,4	Cieslinski (2014)
Cinzas [% b.s.]	3,07 ± 0,14	3,2	Channiwala e Parikh (2002)
		4,4	Sánchez (2010)
		4,6	Arantes (2014)
		18,8	Cieslinski (2014)
Carbono Fixo [% b.s.]	5,73 ± 0,90	13,15	Channiwala e Parikh (2002)
		14,8	Sánchez (2010)
		16,1	Arantes (2014)
		9,2	Cieslinski (2014)
PCS [MJ/kg]	16,22 ± 0,22	18,73	Channiwala e Parikh (2002)
		16,70	Sánchez (2010)
		18,77	Arantes (2014)
		15,96	Cieslinski (2014)

A umidade encontrada se mostrou elevada, o que reduz o poder calorífico útil da biomassa, além de aumentar formação de produtos indesejáveis durante o processo de combustão, o que mostra a necessidade de uma etapa de secagem do material.

A presença de materiais voláteis encontrada foi elevada, de 91,20%. Tal teor pode ser considerado muito positivo, tendo em vista que quanto maior o teor de materiais voláteis, maior será a facilidade de ignição da biomassa, favorecendo a liberação de energia durante o processo de combustão. Entretanto, isso também proporciona uma queima rápida, com baixa resistência.

O teor de cinzas apresentado pelo bagaço de cana-de-açúcar foi de 3,07%, valor dentro do intervalo de cinzas em biomassas residuais, que pode variar de 0,2 a 6,6% (GROTTO et al., 2021). Esse valor encontrado é positivo, uma vez que a alta concentração de cinzas pode reduzir a eficiência do processo de combustão, influenciando no processo de transferência de calor e massa, além da necessidade de se dar uma destinação apropriada para atendimento das normas ambientais.

Já o teor de carbono fixo apresentado foi de 5,73%, valor reduzido quando comparados aos demais dados apresentados na Tabela 4.2. Este valor pode ser considerado de baixa eficácia, uma vez que ele está diretamente ligado à eficiência energética, aumentando o tempo de queima, além de proporcionar um maior índice de combustão e um poder calorífico superior mais elevado.

O cálculo do poder calorífico superior para a biomassa em estudo foi de 16,22 MJ/kg, valor próximo aos apresentados por outros estudos. Esse parâmetro é muito importante pois quantifica a quantidade de energia que pode ser liberada durante a combustão, medindo a eficiência do combustível.

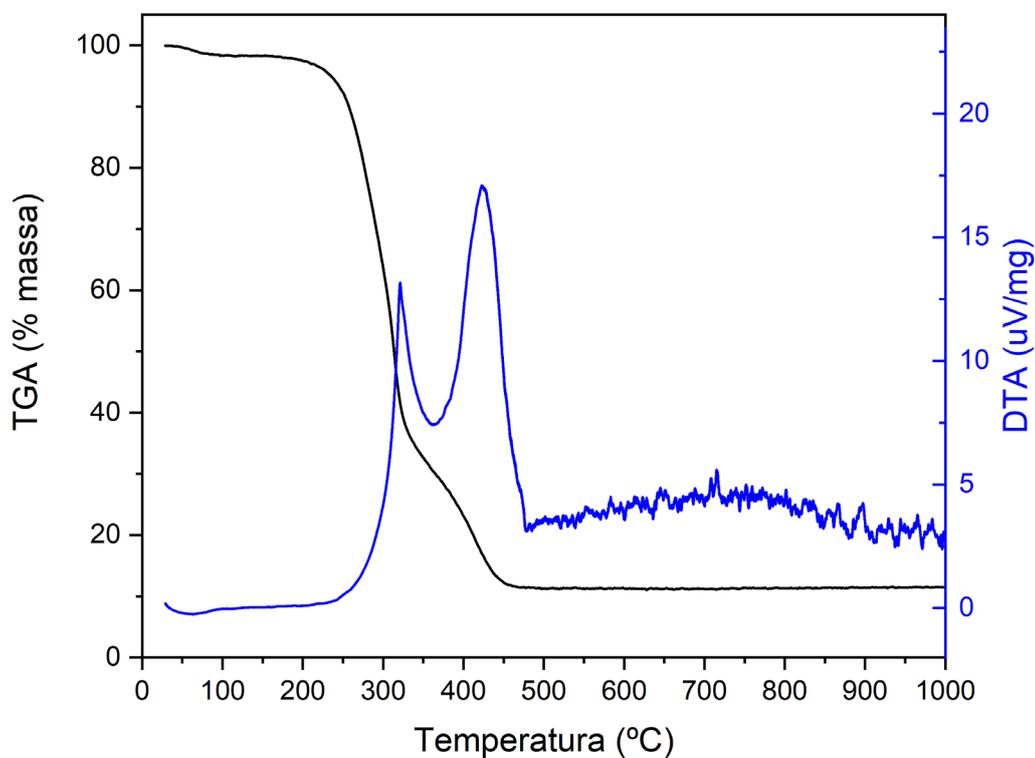
A partir dos dados obtidos de análise imediata e poder calorífico superior, obteve-se elevada umidade para o bagaço de cana-de-açúcar, o que não é interessante para a obtenção de sua energia através da queima, em virtude de a água absorver grande parte da energia liberada nesse processo para evaporar. Contudo, a umidade é um parâmetro que pode ser controlado, ao contrário dos demais. Dessa forma, o bagaço de cana apresenta ótimos parâmetros de teores de cinzas e voláteis que contribuem para uma combustão eficiente e grande poder de ignição, além do teor de carbono fixo considerável, que mantém o tempo de queima. O bagaço de cana-de-açúcar apresentou um bom poder calorífico, que confirma o potencial do uso de tal biomassa para a geração de energia.

#### 4.4. Termogravimetria

A Figura 4.4 e a Figura 4.5 representam as curvas de TGA e DTA para o bagaço de cana-de-açúcar *in natura* e seco, respectivamente. No início da curva pode ser notada uma pequena variação da massa de amostra em torno de 100°C, relacionada a saída de parte dos materiais voláteis e de umidade.

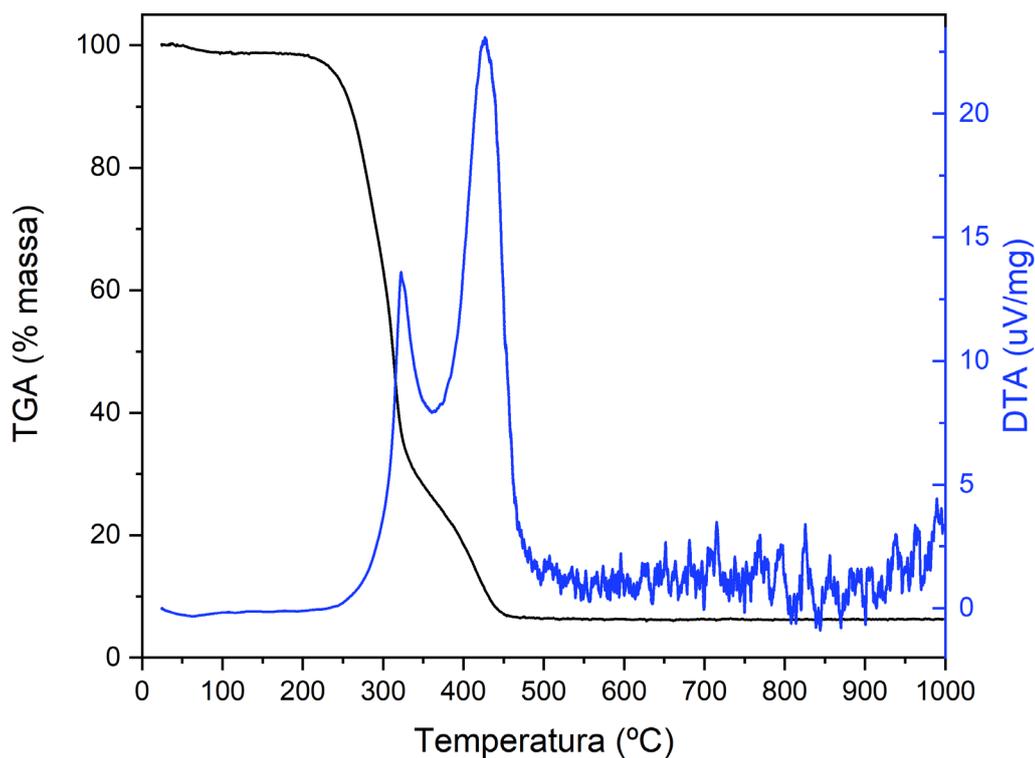
A perda de massa verificada em torno da temperatura de 100°C, mesmo na curva para o bagaço de cana *in natura*, é de aproximadamente 5%, bem menor do que aquela encontrada por meio da análise imediata. Isso pode ser explicado devido a granulometria do material utilizado para a termogravimetria. Tendo em vista a pequena massa utilizada para o experimento, cerca de 4mg, a qual foi suficiente para preencher o cadinho do equipamento, não representa a granulometria do material como um todo, pois foi notável o pequeno tamanho de partícula utilizado, se assemelhando a um pó de bagaço. Assim, tendo que a pequena granulometria dificulta a absorção de umidade, a variação de massa visualizada pela TGA difere daquela encontrada por meio da análise imediata.

Figura 4.4. Curvas TGA e DTA para o bagaço de cana *in natura*.



Fonte: O Autor.

Figura 4.5. Curvas TGA e DTA para o bagaço de cana seco.



Fonte: O Autor

É possível ainda notar a presença de dois picos exotérmicos. O primeiro ocorre na zona entre 260°C e 340°C aproximadamente, correspondendo a degradação de celulose e hemicelulose, polímeros que se degradam com uma menor quantidade de energia. A hemicelulose se decompõe entre as temperaturas de 275 e 305°C, enquanto a celulose se degrada entre 300 e 325°C (RAMBO et al., 2015). O segundo pico que pode ser observado na faixa de temperatura de que vai de 300°C até aproximadamente 450°C, onde é possível verificar a queda de massa relacionada à decomposição da lignina, polímero que necessita de uma maior quantidade de energia para quebrar suas ligações. Ao final, encontra-se a massa de material que não pode entrar em combustão e as cinzas resultantes do processo (GROTTO, et al., 2021).

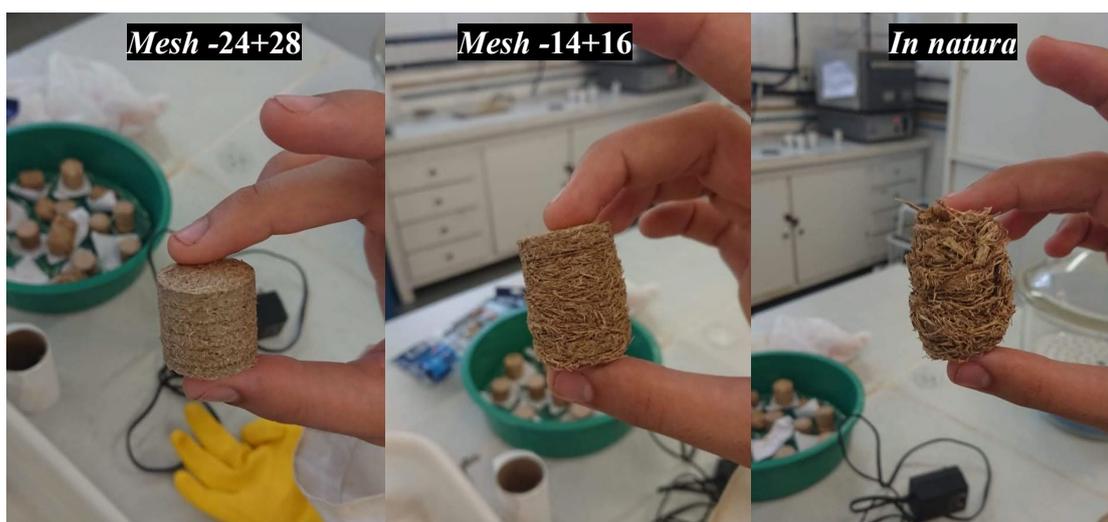
Ao comparar a Figura 4.4 com a Figura 4.5, nota-se que a porcentagem restante de material proveniente do TGA do bagaço de cana-de-açúcar *in natura* é maior quando comparada ao que restou de massa na TGA do bagaço seco. Essa diferença pode ser uma evidência de que a umidade presente na biomassa resulta na produção de compostos indesejáveis e influencia na quantidade de materiais restantes do processo, atrapalhando o processo de combustão.

Ainda, para a curva de DTA, verifica-se que os picos exotérmicos apresentados pelo bagaço de cana seco possuem uma maior dimensão, indicando que a sua combustão resulta em uma maior liberação de energia, quando comparado ao bagaço com um maior índice de umidade.

#### 4.5. Pelletização

O processo de densificação do bagaço de cana-de-açúcar foi feito utilizando-se de diferentes granulometrias, além do bagaço *in natura*. A partir dos *pellets* fabricados foi possível notar que o processo de densificação se mostrou mais eficiente com partículas menores que 0,85 mm (*mesh* 16-24), proporcionando uma maior adesão das partículas e o favorecimento da compactação do material. Partículas maiores tiveram resultados satisfatórios, como a densificação do material retido entre as peneiras de *mesh* -14+16, mas a compactação do material *in natura*, sem a prévia separação granulométrica, não foi de qualidade, sendo que o *pellet* começou a se expandir pouco tempo após sua confecção. A presença de partículas maiores, assim como a irregularidade do material dificultou a sua compactação. Alguns *pellets* confeccionados podem ser observados na Figura 4.6, onde as fotos representam suas condições após uma semana armazenadas em um dessecador.

Figura 4.6. Pellets de diferentes granulometrias após uma semana.



Fonte: O Autor

Na Tabela 4.3 estão apresentados os dados das granulometrias utilizadas para o processo de compactação do bagaço de cana, bem como a variação de dimensões e da massa dos pellets após o período de uma semana.

Tabela 4.3. Variações de massa e dimensões dos *pellets* após uma semana.

<b>Granulometria</b>	<b>Diâmetro médio</b>	<b>Variação Dimensões</b>	<b>Variação Massa</b>
<i>In natura</i>	1,03 mm <sup>1</sup>	32,39%	21,04%
<i>Mesh -14+16</i>	1,10 mm	2,30%	16,21%
<i>Mesh -16+24</i>	0,85 mm	2,45%	16,41%
<i>Mesh -24+28</i>	0,65 mm	0,90%	17,52%

Obs: <sup>1</sup>D<sub>ps</sub>

**Fonte:** O Autor.

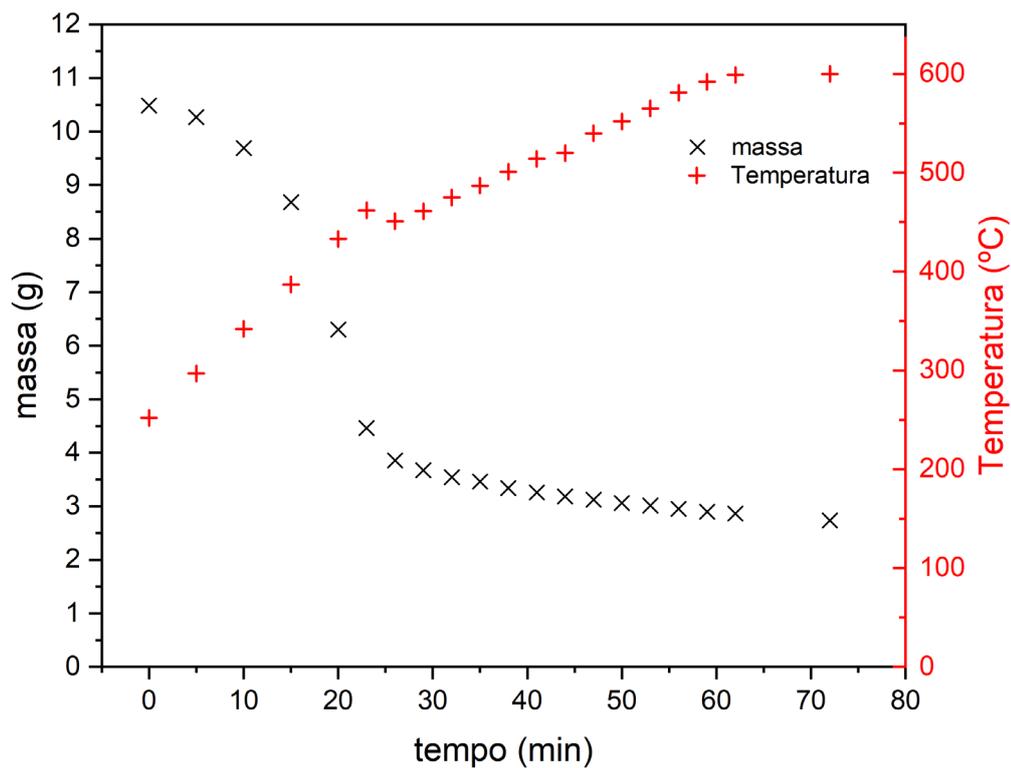
Por meio dos dados apresentados observa-se que *pellets* confeccionados com uma variação granulométrica mais estreita apresentam uma variação de massa entre 16 e 17,5%, enquanto tiveram pequena variação das dimensões. Entretanto, o *pellet* fabricado com o material *in natura* apresentou grande variação das dimensões, de mais de 32%, apresentando expansão, conforme pode ser observado na Figura 4.6.

De maneira geral, o bagaço de cana-de-açúcar se mostrou uma biomassa passível de compactação, procedimento interessante, tendo em vista o seu elevado volume. Assim sendo, a aglomeração dessa biomassa pode facilitar o estoque e o seu transporte, além de facilitar o manuseio.

#### **4.6. Combustão**

O processo de combustão foi feito utilizando-se um *pellet* fabricado com o bagaço de cana que passou pela peneira de *mesh 28* até o fundo, ou seja, com diâmetro médio de 0,15 mm. Sua variação de massa com o tempo, bem como a variação de temperatura podem ser observados na Figura 4.7.

Assim como no processo de termogravimetria, pode-se observar que a maior taxa de reação ocorre no intervalo de temperatura de 300 a 450°C. Após essa temperatura a taxa de perda de massa começa a diminuir, ficando praticamente constante.

Figura 4.7. Massa do *pellet* e temperatura no processo de combustão.

Fonte: O Autor.

A combustão realizada após o processo de compactação mostra sua eficiência, visto que o material apresentou uma boa ignição e taxa de reação. Sua queima ocorreu por um período entre 20 e 30 minutos, assim conforme Gil et. al (2010), que avaliaram a combustão de *pellets* fabricados a partir de misturas de diferentes biomassas. Dessa forma, pode-se avaliar que a densificação do bagaço proporcionou uma maior duração a combustão.

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Através da determinação da massa específica do bagaço de cana foi possível notar a grande heterogeneidade e porosidade do material, mostrado pelo elevado desvio apresentado entre os resultados, típico de materiais porosos heterogêneos. Tal fato pode ser comprovado por meio da análise granulométrica, que apresentou diferença entre as réplicas devido ao caráter heterogêneo e irregular da biomassa em estudo, dificultando a passagem pelas peneiras. Ainda, 60% das partículas apresentaram um diâmetro médio menor que 1,5mm, o que favorece a combustão do material.

A análise imediata mostrou o elevado teor de materiais voláteis, o que favorece a combustão, com uma ótima ignição e liberação de energia. Outro aspecto positivo encontrado remete ao baixo teor de cinzas, que reduz os resíduos gerados pela queima, além de evitar diversos problemas relacionados a transferência de calor e massa. Já a umidade do material foi elevada, mostrando a necessidade de se realizar um processo de secagem preliminar a sua combustão, pois a água presente no material reduz significativamente a energia liberada durante tal processo. O poder calorífico superior encontrado para o bagaço de cana-de-açúcar foi adequado, o que explica a sua aplicação para a geração de energia.

Através análise termogravimétrica foi possível observar a presença de componentes orgânicos de alto poder calorífico e, ao comparar as análises para o bagaço *in natura* e seco, verifica-se que os resíduos restantes para o material seco são bem menores em relação ao material *in natura*, indício de que a água presente no material provoca uma queima menos eficiente, com a formação de compostos indesejáveis.

No processo de compactação da amostra, verificou-se que a granulometria influencia diretamente na qualidade dos *pellets*. Partículas menores favorecem a compactação do material, proporcionando uma maior adesão e conseqüente menor expansão dos *pellets* confeccionados com o tempo. Ainda, a combustão após o processo de densificação mostrou sua eficiência, com boa ignição e taxa de reação.

Por meio dos dados encontrados, pode-se afirmar a importância de conhecer as características da biomassa para sua utilização como fonte energética, sendo que o bagaço de cana-de-açúcar se mostrou favorável para esta prática. Assim, estudos complementares podem ser realizados, tomando em conta as diferentes amostras de bagaço que podem ser obtidas de diferentes espécies e localidades; amostras dessa biomassa logo após a moagem

e armazenada por diferentes períodos a fim de se verificar a influência do tempo de armazenamento sobre o material; estudar a influência da força aplicada no processo de compactação sobre a formação dos *pellets*, verificando a taxa de compressão e densidade energética mais eficientes; e, a combustão de *pellets* fabricados com outras granulometrias, formas e dimensões.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, Y. V. de; OLIVEIRA, M. A. G. de; GUERRA, S. M. G. **Energia, Economia, Rotas Tecnológicas**. Málaga, Espanha: Eumed.Net, Universidade de Málaga, 2010
- AÇMA, H. H. **Combustion characteristics of different biomass materials. Energy Conversion e Management**. *Istambul: Pergamon*, v. 44, p. 155-162, 2003.
- AI-KHAYRI, J. M., JAIN, S. M., & JOHNSON, D. V. **Advances in plant breeding strategies: breeding, biotechnology and molecular tools. Volume 1**. Cham: Springer International Publishing, 2015
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 2<sup>a</sup> ed. 2005.
- ARANTES, D. C. **Bagaço de cana-de-açúcar: análise térmica e energética de biomassa**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia Faculdade de Engenharia Mecânica, Uberlândia- MG, 2014.
- ARRANZ, J. I., MIRANDA, M. T., MONTERO, I., SEPÚLVEDA, F. J., ROJAS, C.V. **Characterization and combustion behaviour of comercial and experimental wood pellets in South West Europe**. *Fuel* 142, 199-207. 2015
- ARAÚJO, D. de S. S. de. **Co-Combustão de biomassa e carvão em leito fluidizado: Impactos nas emissões atmosféricas de NOx, SO2, CO, dioxinas e furanos e material particulado**. 2008. 141p. Dissertação (Mestrado em Bioenergia), Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2008.
- BARBOSA, P. S. **Procedimentos para caracterização química do bagaço de cana-de-açúcar: estudos para otimização e padronização**. 2018. 60 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2018.
- BARRETO, E. J. F. **Combustão e gasificação de biomassa sólida: soluções energéticas para a Amazônia**. 1ed. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008.
- BERKMEN, P. et al. **The Global Financial Crisis - Explaining Cross-Country Differences in the Output Impact**. [s.l.] *International Monetary Fund*, 2009.
- BOWMAN, D. et al. **Fire in the Earth System**. *Science*, v.324, 24 apr. 2009
- BP - *British Petroleum*. **Statistical Review of World Energy**. Abu Dhabi, 70 edition, 2021. Disponível em: <<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-primary-energy.pdf>>. Acesso em: 20 de fev. de 2022.
- BRUN, J. R. **Um estudo multicascos para compensação de energias renováveis: vantagens da biomassa à luz da resolução normativa 482 de 17/04/12 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)**. Monografia de Especialização — Departamento

Acadêmico de Gestão e Economia, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná: Curitiba-PR, 2012.

CARVALHO, J. F. DE. **Energia e sociedade**. Estudos Avançados, v. 28, n. 82, p. 25–39, dez. 2014.

CGEE 2001 - Centro de Gestão e Estudos Energéticos. **Geração de energia elétrica a partir da biomassa no Brasil: situação atual, oportunidades e desenvolvimento**. Brasília, 2001.

CHANNIWALA, S. A.; PARIKH, P. P. **A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels**. Fuel, v. 81, p. 1051-1063, 2002.

CIESLINSKI, J. E. F. **Estudo da emissão e do controle dos gases e particulados provenientes da queima da biomassa**. 2014. 157p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá, 2014

COMÉRIO, L. et al. **Casca do Café para a Geração de Energia: Caracterização da Biomassa e Análise dos Gases de Combustão**. XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Anais... Fortaleza: 2016.

CONTECH. **Massa Específica e Massa Específica Aparente em Agregado Miúdo**, 2018. Disponível em: < <https://contech.eng.br/servicos/ensaios-em-agregados/massa-especifica-e-massa-especifica-aparente-em-agregado-miudo>>. Acesso em: 19 de abr. de 2022.

Copersucar - Açúcar e Etanol para um planeta sustentável. **Saiba como é o funcionamento de uma usina de cana-de-açúcar**, 2018. Disponível em: <<https://www.copersucar.com.br/noticias/funcionamento-de-uma-usina-de-cana-de-acucar/>>. Acesso em: 25 de fev. de 2022.

Copersucar - Açúcar e Etanol para um planeta sustentável, 2017. Disponível em: <<https://www.copersucar.com.br/noticias/proalcool-o-momento-em-que-o-brasil-comecou-valorizar-energias-renovaveis/>>. Acesso em: 15 de mar. de 2022.

CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.S.; OLIVARES G., E. **Biomassa para energia**. Campinas: Unicamp, 2008. p.31-60.

CREMASCO, M. A. **Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluidomecânicos**. São Paulo: Edgar Blucher, 2012. p. 126-157.

DAL-BÓ, VANESSA. **Potencialidades para o aproveitamento de biomassa de casca de café robusta para a geração de energia**. – Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Universitário Norte do Espírito Santo, 2016

DENARI, G. B.; CAVALHEIRO, E. T. G. **Princípios e Aplicações de análise térmica**. Universidade de São Paulo – Instituto de Química de São Carlos. São Carlos, 2012, 48p.

DENTELLO, R. O. **Estudo das características fluidodinâmicas do bagaço de cana de açúcar para aplicações da gaseificação no setor sucroalcooleiro**. 2015. 79 f. , 2015. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/123082>>. Acesso em: 29 de mar. de 2022.

DIEESE – Departamento Intersindical de Estatística e Estudos Socioeconômicos. **Nota técnica: Crise de energia e transição justa**, n 263, 05 de outubro de 2021.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Uso da Biomassa para a Geração de Energia**, 1ª ed. Aracajú – SE, 2016.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Atlas de Eficiência Energética Brasil 2020**, 2021. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-651/Atlas2021\\_PT\\_2022\\_02\\_04.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-651/Atlas2021_PT_2022_02_04.pdf). Acesso em 23 de fev. de 2022.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional (BEN) 2021: Ano base 2020**, 2021. Disponível em < <https://ben.epe.gov.br> >. Acesso em: 23 de fev. de 2022.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Matriz Energética e Elétrica**, 2021. Disponível em: < <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica> > Acesso em: 23 de fev. de 2022.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. **FAOSTAT: Food and Agriculture data**, 2021.

FARIAS, L. M.; SELBITTO, M. A. **Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras**. Revista Liberato, v. 12, n. 17, p. 07-16, 2011.

FERREIRA NETO, A. B.; CORRÊA, W. L. R.; PEROBELLI, F. S. **Consumo de energia e crescimento econômico: uma análise do Brasil no período 1970**. *Análise Econômica*, v. 34, n. 65, 2 mar. 2016.

FONSECA, R. M. **Iluminação elétrica**. São Paulo (Sp): Mcgraw-Hill Do Brasil, 1972.

GARCÍA, R.; PIZARRO, C.; LAVÍN, A. G.; BUENO, J. L. **Characterization of Spanish biomass wastes for energy use**. *Bioresource Technology*, v. 103, p. 249-258, 2012.

GEBRIN, V. M. G.; CARVALHO, A. A. de; DORI, D. J. L.; OLIVEIRA, R. P. A.; DALBÓ, V.; FREIRE, J. T.; FREIRE, F. B. **Caracterização do bagaço de cana-de-açúcar para fins energéticos**. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Química – COBEQ. FAURGS, Gramado – RS, 2021.

GEBRIN, V. M. G.; CARVALHO, A. A. de; DORI, D. J. L.; OLIVEIRA, R. P. A.; DALBÓ, V.; FREIRE, J. T.; FREIRE, F. B. **Isotermas de sorção do bagaço de cana-de-açúcar para estudo da higroscopia do material**. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Química – COBEQ. FAURGS, Gramado – RS, 2021.

GIL, M. V.; OULEGO, P.; CASAL, M. D.; PREVIDA, C.; PIS, J. J.; RUBIERA, F. **Mechanical durability and combustion characteristics of pellets from biomass blends**. *Bioresource Technology*, v. 101, n. 22, p. 8859–8867, nov. 2010.

- GODOY, M. M. **Persistência do tradicional: o processo de modernização da agroindústria canieira do Brasil e a sobrevivência de formas produtivas não-capitalistas**. Revista Brasileira de História & Ciências Sociais, São Leopoldo: Universidade do Vale do Rio dos Sinos - Unisinos, v. 5, n. 10, p. 165-186, dez. 2013.
- GOLDEMBERG, J. **Energia e desenvolvimento**. Estudos Avançados, v. 12, p. 7-15, 1 ago. 1998.
- GOLDEMBERG, J. **Energia e Sustentabilidade**. Revista de Cultura e Extensão USP, v. 14, p. 33-43, 2015.
- GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia e meio ambiente no Brasil**. Estudos Avançados, v. 21, n. 59, p. 7-20, abr. 2007.
- GROTTO, C. G. L.; COSTA, A. M. F. C.; COLARES, C. J. G.; PEREIRA, D. H. **CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR COM VISTAS ENERGÉTICAS**, ForScience, Formiga, v. 9, n. 1, e00928, jan./jun. 2021. DOI: 10.29069/forscience.2021v9n1.e928.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Área plantada, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras temporárias. Produção agrícola municipal**, 2018.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Área plantada, área colhida, quantidade produzida, rendimento médio e valor da produção das lavouras temporárias. Produção agrícola municipal**, 2021.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Dinâmica Territorial da Produção agropecuária: A geografia da cana-de-açúcar**, 2017.
- INEE – Instituto Nacional de Eficiência Energética. **Bioenergias: Cana-de-açúcar**, 2021. Disponível em: <[http://www.inee.org.br/biomassa\\_cana.asp?Cat=biomassa](http://www.inee.org.br/biomassa_cana.asp?Cat=biomassa)>. Acesso em: 23 de fev. de 2022.
- International Energy Agency (IEA)*. **Data and Statistics**. Paris, 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and-statistics>> Acesso em: 23 de fev. de 2022.
- IONASHIRO, M. Giolito: **Fundamentos da Termogravimetria, Análise Térmica Diferencial e Calorimetria Exploratória Diferencial**. São Paulo: Giz Editorial, 2004, 82p.
- IPCC – *The Intergovernmental Panel on Climate Change*. **Climate Change 2021 Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, 2021. Disponível em: <[https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_SPM\\_final.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf)> . Acesso em 25 de fev. de 2022.
- JENKINS, B. M.; BAXTER, L. L.; MILES JUNOR, T. R.; MILES, C. T. R. **Combustion properties of biomass. Fuel Processing Technology**, Londres, v. 54 p. 17-46, 1998

- JORDAN, R. A. JUNIOR, R.B. CORTEZ, L. A. B. MOTOMIYA, A. V. A. **Caracterização granulométrica de biomassa polidispersa pelo método de peneiramento mecânico.** Engenharia Agrícola, v. 36, n. 1, p. 102–113, fev. 2016.
- KLASON, T. **Modelling of Biomass Combustion in Furnaces.** (Tese de Doutorado) Department of Energy Science Lund Institute of Technology, Lund, 2006.
- KLAUTAU, J. V. P. **Análise experimental de uma fornalha a lenha de fluxo cocorrente para secagem de grãos.** 2008. 193p. Dissertação (mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba: 2008.
- LOO V. S.; KOPPEJAN, J. *The handbook of biomass combustion and co-firing.* London: Earthscan, 2008.
- LU, Renata. **Cenário econômico no Brasil e no mundo pós-covid 19.** Agência Brasília, 2021. Disponível em: <<https://www.agenciabrasilia.df.gov.br/2021/06/23/cenario-economico-no-brasil-e-no-mundo-pos-covid-19/>>. Acesso em: 16 de fev. de 2022.
- MATSUOKA S, STOLF R. *Sugarcane tillering and ratooning: key factors for a profitable cropping. Sugarcane: Production, cultivation and uses.* 2012;5(2):137-57.
- MCKENDRY, P. *Energy production from biomass (part 1): overview of biomass.* Bioresource Technology. n. 83, p. 37-46, 2002.
- MILLES, T.R. **Report for National Renewable Energy Laboratory.** In: STEVEN,H.P, 2008
- MIRANDA, R. L.; MARTINS, E. M.; LOPES, K. **A potencialidade energética da biomassa no Brasil. Desenvolvimento Socioeconômico em Debate,** v. 5, n. 1, p. 94, 29 maio 2019.
- MOREIRA, J. M. M. Á. P. **Potencial e participação das florestas na matriz energética.** Pesquisa Florestal Brasileira, v. 31, n. 68, p. 363–363, 3 jun. 2011.
- MOTTA, I. L., MIRANDA, N. T., MACIEL FILHO, R., MACIEL, M. R. W. *Biomass gasification in fluidized beds: A review of biomass moisture content and operating pressure effects.* Renew. Sust. Energ. Ver 97, 2018.
- NASCIMENTO, T.; MENDONÇA, A. T. B. B.; CUNHA, S. **Inovação e sustentabilidade na produção de energia: o caso do sistema setorial de energia eólica no Brasil.** Cadernos EBAPE. BR, v. 10, n. 3, p. 630-651, 2012.
- NETO, A. B. F.; CORRÊA, W. L. R.; PEROBELLI, F. S. **Consumo de Energia e Crescimento Econômico: uma Análise do Brasil no período 1970-2009.** Análise Econômica, v. 34, n. 65, 2016.
- NOGUEIRA, L. A., et al. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações** - Brasília: ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, 2000.

NOVO, L. P. **Novas perspectivas para uma biorrefinaria de cana-de-açúcar no Brasil**. 2016. Tese (Doutorado em Físico-Química) - Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016. doi:10.11606/T.75.2016.tde-12082016-090114. Acesso em: 23 de fev. de 2022.

NUNES, T.; FINZER, J. **Desempenho de processamento industrial de cana-de-açúcar**. III Encontro de desenvolvimento de processos agroindustriais, Uniube. Uberaba, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.uniube.br/bitstream/123456789/930/1/DESEMPENHO%20DE%20PROCESSAMENTO%20INDUSTRIAL%20DE%20CANA-DE-A%20C3%87%20C3%9ACAR.pdf>>. Acesso em: 26 de fev. de 2022.

OLIVEIRA, C. M. de. **Biomercado: Política e legislação adequadas**. Viçosa, MG, 2015.

OLIVEIRA, R. A. F. de. **A geração de energia elétrica através do uso de biomassa na Bahia: Condicionantes e oportunidades**. Dissertação (Mestrado em Regulação da Indústria de Energia) - Universidade de Salvador, p. 211, 2006.

PAES, J.M.V., MARCIANO, N., BRITO, C.H.D., CARDOSO, A.A., MARTINEZ, H.H.P., **Estudo de espaçamentos e fracionamento de doses de nitrogênio na produção e características tecnológicas de três variedades de cana-de-açúcar**, 1996.

PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. *A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels*. *Fuel*, v. 84, p. 487-494, 2005.

PELLEGRINI, M. C. **Inserção de centrais co-geradoras a bagaço de cana no parque energético do estado de São Paulo: exemplo de aplicação de metodologia para análise dos aspectos locacionais e de integração energética**. 2002. 187 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Eletrotécnica e Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

PINHEIRO, J. C. **Análise da dinâmica das áreas ocupadas pela cultura canavieira no Brasil entre 1990 e 2013: uma contribuição ao estudo do circuito espacial produtivo do setor sucroenergético**. 2015. 170 p. Dissertação (Mestrado)–Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, Campinas, 2015.

PWC Global. **Environmental, Social and Governance (ESG)**, 2022. Disponível em: <[https://www.pwc.com/gx/en/issues/esg.html?WT.mc\\_id=CT3-PL300-DM1-TR2-LS4-ND30-TTA9-CN\\_the-new-equation-esg&gclid=ds](https://www.pwc.com/gx/en/issues/esg.html?WT.mc_id=CT3-PL300-DM1-TR2-LS4-ND30-TTA9-CN_the-new-equation-esg&gclid=ds)>. Acesso em: 01 de mar. de 2022.

RAMBO, M. K. D. et al. Estudo de análise termogravimétrica de diferentes biomassas lignocelulósicas utilizando a análise por componentes principais. *Ciência e Natura*, Santa Maria, v. 37, n. 3, p. 862-868, 2015.

SÁNCHEZ, C. G. (Org.). **Tecnologia da gaseificação de biomassa**. Grupo Átomo e Alínea, 2010.

SANTOS, R. M. DOS; RODRIGUES, M. DE S.; CARNIELLO, M. F. **Energia e sustentabilidade: panorama da matriz energética brasileira**. *Scientia Revista Científica Multidisciplinar*, v. 6, n. 1, p. 13-33, 3 jan. 2021.

SHOJAEIARANI, J.; BAJWA, D.; BAJWA, S. *Properties of Densified Solid Biofuels in Relation to Chemical Composition, Moisture Content, and Bulk Density of the Biomass*. BioRes. 14(2), 4996-5015, 2019.

SOUZA, S. N. M. de, SORDI, Al., OLIVA, C. A. **Potencial de energia primária de resíduos vegetais no Paraná: 4º Encontro de Energia no Meio Rural**. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. Proceedings online. Disponível em:

<[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022002000200042&lng=en&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000200042&lng=en&nrm=abn)>. Acesso em: 22 de fev. de 2022.

TESSMER, H. **Uma síntese histórica da evolução do consumo de energia pelo homem**. Revista Liberato, v. 3, n. 3, 2002.

UNICA – União da Indústria de Cana-de-açúcar. **Bioeletricidade**, 2021. Disponível em: <<https://unica.com.br/setor-sucroenergetico/bioeletricidade/>>. Acesso em: 23 de fev. de 2022.

VIEIRA, A. C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas**. 56p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Cascavel, 2012.