



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

JUAN PABLO ARTEAGA RAMOS

Torrefação seca oxidativa do bagaço de cana-de-açúcar para fins energéticos

Guaratinguetá
2023

Juan Pablo Arteaga Ramos

Torrefação seca oxidativa do bagaço de cana-de-açúcar para fins energéticos

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para obtenção do título de Mestre em Engenharia em Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Manuel Romero Luna

Coorientadora: Prof. Dra. Ivonete Ávila

Guaratinguetá
2023

R175t	Ramos, Juan Pablo Arteaga Torrefação seca oxidativa do bagaço de cana-de-açúcar para fins energéticos / Juan Pablo Arteaga Ramos - Guaratinguetá, 2023. 62 f : il. Bibliografia: f. 54-62 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2023. Orientador: Prof. Dr. Carlos Manuel Romero Luna Coorientador: Profª. Drª Ivonete Ávila 1. Biomassa. 2. Energia - Fontes alternativas. 3. Bagaço de cana. I. Título.
	CDU 620.91(043)

Luciana Máximo
Bibliotecária/CRB-8 3595

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

O potencial desta pesquisa está no fornecimento do fundamento técnico da torrefação oxidativa do bagaço de cana-de-açúcar visando uma possível implementação em sistemas de cogeração de energia a base de cana-de-açúcar. A torrefação oxidativa usando como gás de arraste uma mistura entre ar e nitrogênio mostra-se promissor, devido à redução significativa deste gás inerte impactando no custo da torrefação. A demonstração da viabilidade técnica da torrefação oxidativa do bagaço de cana-de-açúcar pode ter um impacto regional e nacional, já que a cogeração de energia a base de cana-de-açúcar está bem distribuída no estado de São Paulo e presente em outros estados do Brasil.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The potential of this research lies in providing the technical basis for the oxidative roasting of sugarcane bagasse with a view to possible implementation in energy cogeneration systems based on sugarcane. Oxidative roasting using a mixture of air and nitrogen as a carrier gas shows promise, due to the significant reduction of this inert gas, impacting the roasting cost. Demonstrating the technical viability of oxidative roasting of sugarcane bagasse could have a regional and national impact, since sugarcane-based energy cogeneration is well distributed in the state of São Paulo and present in other states in Brazil.

JUAN PABLO ARTEAGA RAMOS

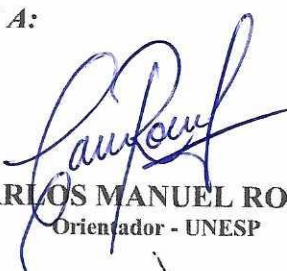
**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA"**

**PROGRAMA: ENGENHARIA
CURSO: MESTRADO**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Manoel Cleber de Sampaio Alves
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. CARLOS MANUEL ROMERO LUNA
Orientador - UNESP


Prof. Dr. DORIVAL PINHEIRO GARCIA
Faculdade de Ciências Sociais e Agrárias de Itapeva


Prof.ª. Dr.ª. MARIANA PIRES FRANCO
UNESP

SETEMBRO de 2023

DADOS CURRICULARES

JUAN PABLO ARTEAGA RAMOS

NASCIMENTO 09/07/1996 – Lórica, Córdoba / Colômbia

FILIAÇÃO Alejandro Manuel Arteaga Vargas
Emelina Rosa Ramos Ballesta

2013/2020 Engenheiro Mecânico
Universidad de Córdoba

Principalmente dedico este trabalho a meus pais que me deram a educação necessária para ter esta disciplina e a minha esposa que me acompanha durante esta viagem.

AGRADECIMENTOS

Agradeço grandemente ao pessoal que apoio este processo, ao pessoal técnico da UNESP Itapeva que sempre estiveram prestos a me ajudar, principalmente a Felipe Fagnani e Thiago Oliveira. Ao professor Carlos Romero e a Greta Arce pelo seu acolhimento no Brasil, assim como a meus amigos Diego Racero e Elias Durango que acompanharam e ajudaram ao desenvolvimento deste trabalho e da minha adaptação no Brasil.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) - código de financiamento 001.

“El tesoro más grande de un hombre son sus
sueños”

Juan Pablo Arteaga Ramos

RESUMO

A Biomassa é uma energia renovável que visa a substituição parcial dos combustíveis fósseis, dentre essas biomassas destacasse no Brasil o bagaço de cana-de-açúcar (BCA), o qual é um subproduto do processamento de cana-de-açúcar (a maior safra produzida no país). No Brasil surgiu a necessidade de aproveitar o BCA, e atualmente supre ao redor de 16% da demanda energética nacional. No entanto, o uso de BCA na produção de energia tem seus desafios, isto devido à natureza intrínseca do material e a características que dificultam seu processo de queima. Porém, para melhorar essas características pode ser aplicado um método de pré-tratamento. A torrefação, conhecido como um processo de pré-tratamento termoquímico onde a biomassa é aquecida, normalmente num ambiente com atmosfera inerte facilitando a eliminação de água e material volátil, obtendo ao final uma biomassa com características combustíveis melhoradas. Contudo, o uso de um ambiente inerte na torrefação dificulta a sua implementação em escala industrial. O objetivo deste trabalho foi estudar a torrefação de BCA num ambiente oxidativo, utilizando temperaturas entre 200 e 300 °C e concentrações volumétricas de oxigênio entre 0 e 20%. Obteve-se que a torrefação oxidativa melhorou as características energéticas do BCA, e os parâmetros de avaliação mostraram uma tendência definida com o aumento da temperatura e a concentração de oxigênio, por exemplo, o fator de melhoramento aumento, no entanto, o rendimento energético e rendimento mássico diminuíram. Porém, a torrefação oxidativa conseguiu gerar calor dentro do reator, diminuindo a demanda energética do processo e obtendo resultados semelhantes ao da torrefação inerte em temperaturas inferiores, o que visa sua implementação na escala industrial.

PALAVRAS-CHAVE: Biomassa; Processos termoquímicos; Energia.

ABSTRACT

Biomass is a renewable energy that aims to partially replace fossil fuels, among these biomasses, sugarcane bagasse (SB) stands out in Brazil, which is a byproduct of sugarcane processing (the largest crop produced in the country). In Brazil, the need to use bagasse arose, and it currently supplies around 16% of the national energy demand. However, the use of BCA in energy production has its challenges, due to the intrinsic nature of the material and characteristics that make its burning process difficult. Conversely, to improve these characteristics a pre-treatment method can be applied. Torrefaction, known as a thermochemical pre-treatment process, where biomass is heated, usually in an environment with an inert atmosphere, facilitating the elimination of water and volatile material, finally obtaining a biomass with a low moisture content, high energy density and improved calorific value. But the use of an inert environment in torrefaction makes it difficult to implement it on an industrial scale. The objective of this work was to study torrefaction of sugarcane bagasse in an oxidative environment, using temperatures between 200 and 300 °C and volumetric oxygen concentrations between 0 and 20%. It was found that oxidative roasting improved the energy characteristics of the SB, and the evaluation parameters showed a definite tendency with increasing temperature and oxygen concentration, for example, the enhancement factor increased, however, the energy yield and mass yield decreased. Nonetheless, oxidative torrefaction was able to generate heat inside the reactor, reducing the energy demand of the process and obtaining results like inert torrefaction at lower temperatures, which aims at its implementation on an industrial scale.

KEYWORDS: Biomass; Thermochemical processes; Energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz Energética ano base 2021	19
Figura 2 – Classificação dos principais tipos de biomassa	20
Figura 3 – Estrutura molecular parcial da celulose	21
Figura 4 – Estrutura molecular parcial de O-acetil-4-O-metilglucuronoxilano	21
Figura 5 – Estrutura molecular dos precursores da lignina	22
Figura 6 – Distribuição de usinas termelétricas a base de bagaço de cana-de-açúcar no Brasil	24
Figura 7 – Distribuição de usinas termelétricas a base de bagaço de cana-de-açúcar no estado de São Paulo	25
Figura 8 – Rotas de conversão de biomassa.....	26
Figura 9 – Esquema da torrefação de biomassa	28
Figura 10 – Classificação da torrefação.....	28
Figura 11 – Pesquisas na área de torrefação nas últimas quatro décadas	29
Figura 12 – Torrefação na partícula de biomassa	30
Figura 13 – Bagaço de cana-de-açúcar <i>in natura</i>	33
Figura 14 – Calorímetro IKA C5000	34
Figura 15 – Equipamentos para preparação do BCA	35
Figura 16 – Bancada experimental de torrefação seca de biomassa	36
Figura 17 – Cilindros de gases comprimidos	37
Figura 18 – Painel de controle e mistura de gases	37
Figura 19 – Sistema de aquecimento	38
Figura 20 – Diferencias de temperatura nos pontos de controle	39
Figura 21 – Sistema de lavagem e anti-retrocesso de chama	39
Figura 22 – BCA seco e peneirado (500-850 μ m)	42
Figura 23 – Curvas TG/DTG do BCA em atmosfera inerte.....	43
Figura 24 – BCA torreficado em atmosferas e temperaturas diferentes	44
Figura 25 – Análise imediata e poder calorífico do BCA torreficado	46
Figura 26 – RM da torrefação do BCA	48
Figura 27 – RE da torrefação do BCA	49
Figura 28 – FM da torrefação do BCA	50
Figura 29 – Comportamento térmico do processo de torrefação	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Artigos sobre torrefação oxidativa de diversas biomassas	31
Tabela 2 – Análise composicional e imediata do BCA.....	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GEE	Gases de Efeito Estufa
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MME	Ministério de Minas e Energia
IEA	International Energy Agency
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FAO	Food and Agriculture Organization of the United States
TORGAS	Torrefaction Gas
BCA	Bagaço de Cana-de-açúcar
NBR	Norma Brasileira Registrada
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
TAPPI	Technical Association of the Pulp and Paper Industry
ASTM	American Society for Testing and Materials
PCS	Poder Calorífico Superior
RM	Rendimento mássico
DE	Densidade Energética
RE	Rendimento Energético

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	Objetivo geral	18
1.1.2	Objetivos específicos	18
2	REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1	BIOMASSA	19
2.1.1	Constituintes da biomassa lignocelulósica	20
2.1.2	Propriedades físicas e químicas da biomassa lignocelulósica	22
2.2	CANA-DE-AÇÚCAR	23
2.2.1	Bagaço de cana-de-açúcar na produção de energia	23
2.3	ROTAS DE CONVERSÃO DE BIOMASSA	26
2.3.1	Processos de conversão termoquímica	27
2.4	TORREFAÇÃO	27
2.4.1	Estado da arte da torrefação	29
2.5	TORREFAÇÃO SECA OXIDATIVA	30
2.5.1	Torrefação seca oxidativa de diversas biomassas	31
2.5.2	Torrefação seca oxidativa de bagaço de cana-de-açúcar	32
3	MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1	BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR	33
3.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA	33
3.2.1	Umidade	33
3.2.2	Análise composicional	34
3.2.3	Análise imediata	34
3.2.4	Poder Calorífico Superior (PCS)	34
3.3	PREPARAÇÃO E AMOSTRAGEM DO BCA	35
3.4	CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS	35
3.5	BANCADA EXPERIMENTAL DE TORREFAÇÃO DE BIOMASSA	36
3.6	PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DA TORREFAÇÃO SECA OXIDATIVA DO BCA	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1	PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO BCA	41
4.1.1	Preparação do BCA	41

4.1.2	Análise composicional e imediata do BCA	42
4.1.3	Análise termogravimétrica	43
4.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO BCA TORRIFICADO	44
4.2.1	Análise imediata e poder calorífico	45
4.3	PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DA TORREFAÇÃO	47
4.4	COMPORTAMENTO TÉRMICO DA TORREFAÇÃO	51
5	CONCLUSÕES	53
5.1	FUTUROS ESTUDOS	53
	REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

No mundo, o rápido aumento da população provocou um incremento significativo na demanda de energia. Atualmente 85% dessa demanda energética é suprida pelos combustíveis fósseis (carvão mineral, petróleo e gás natural), os quais geram problemas ambientais e causam a emissão de Gases Efeito Estufa (GEE) decorrentes da sua queima. O Acordo de Paris em 2015 teve como objetivo fortalecer a resposta global à ameaça das mudanças climáticas; um dos itens é a redução da emissão dos GEE, o que tem estimulado a procura por fontes de energia renováveis (Uemura *et al.* 2017; Ong *et al.* 2020; Yek *et al.* 2021; Kota, *et al.* 2022).

Para satisfazer a demanda de energia visando à redução das emissões de GEE, foram propostas diversas alternativas, dentre elas o uso de biomassa. A biomassa é um recurso renovável, considerado como a quarta fonte de energia no mundo com o potencial de satisfazer a demanda de energia e reduzir as emissões dos GEE (Kota *et al.* 2022; Chen *et al.* 2021).

A matriz energética brasileira, caracteriza-se pela grande participação de energias renováveis, onde a biomassa tem uma participação de aproximadamente 25%. Dentre estas biomassas a cana-de-açúcar é uma das mais usadas para produção de energia, e é a safra com maior produção no país segundo dados da FAO (2022).

No Brasil, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2023), a cana-de-açúcar tem uma representatividade de 15% (ano base 2022) das fontes de energias renováveis na matriz energética brasileira. Da produção de cana-de-açúcar se gera um subproduto o qual é o bagaço de cana-de-açúcar (BCA), atualmente, no Brasil existem usinas sucroalcooleiras, onde o BCA é queimado para produção de vapor de água e/ou para geração de energia elétrica, no entanto o BCA exibe algumas características tais como um elevado teor de umidade ($> 50\%$), natureza higroscópica, baixa massa específica e um poder calorífico relativamente baixo quando comparado com o carvão (Conag *et al.* 2017), o que provoca uma redução da eficiência de aproveitamento. Além disso, o atual sistema de gerenciamento do bagaço de cana-de-açúcar promove perdas de até 15% da massa devido à degradação provocada pela ação microbiana (Lima *et al.* 2018).

Com a finalidade de melhorar as características do BCA e evitar a perda deste material, a literatura propõe a implementação de um método de pré-tratamento conhecido como torrefação, o qual melhora as características da biomassa para fins energéticos, principalmente pelo aumento do seu poder calorífico. O processo de torrefação consiste no aquecimento da biomassa em um intervalo de temperaturas relativamente baixo ($200\text{--}300^{\circ}\text{C}$) aplicando uma baixa razão de aquecimento ($<50^{\circ}\text{C}/\text{min}$), em atmosfera não-oxidativa (inerte), usando gases como

nitrogênio, ou em atmosfera oxidativa usando ar ou uma corrente gasosa contendo uma fração de oxigênio (Cao *et al.* 2023; Bonassa *et al.* 2018; Zhang *et al.* 2019).

A torrefação em atmosfera oxidativa é um método promissor para aplicação industrial, resultando em baixos requerimentos energéticos e condições tecnológicas, assim como também a possibilidade de redução dos custos (Uemura *et al.* 2013). De acordo com Brachi *et al.* (2019), no caso da torrefação não-oxidativa (inerte), o uso de nitrogênio como gás de arraste afeta negativamente a economia do processo para aplicações em grande escala devido ao custo envolvido. Dessa forma, entende-se que a torrefação oxidativa tem algumas vantagens quando comparado à torrefação não-oxidativa.

Durante a torrefação oxidativa, o oxigênio presente no gás de arraste oxida parte dos voláteis que são gerados durante a torrefação e assim energia térmica adicional é produzida. Isto torna a torrefação oxidativa termicamente autossustentável reduzindo significativamente os custos de operação, tornando a torrefação de biomassa comercialmente mais viável (Chen *et al.* 2020). Finalmente, Zhang *et al.* (2019) sugere que esse processo seja a rota potencial para tratamento da biomassa e aumento da sua utilização na indústria.

A literatura apresenta diversos trabalhos sobre o estudo da torrefação oxidativa de diferentes biomassas (Lu *et al.* 2012; Uemura *et al.* 2013; Wang *et al.* 2013; Ramos *et al.* 2017; Uemura *et al.* 2017; Brachi *et al.* 2019; Chen *et al.* 2020; Liu *et al.* 2021; Riaz *et al.* 2022; Riaz *et al.* 2023). Os trabalhos consultados concluem que a torrefação oxidativa melhora as propriedades físicas e químicas da biomassa; o uso de um gás contendo uma concentração de oxigênio pode ser usado como gás de arraste na torrefação. A torrefação não-oxidativa do BCA foi estudada em diversos trabalhos (Joshi *et al.* 2015; Granados *et al.* 2017; Manatura 2020; Shehzad *et al.* 2020), no entanto, o estudo da torrefação oxidativa do BCA (Conag *et al.* 2017; Conag *et al.* 2018) ainda se mostra incipiente.

Dessa forma são necessários mais estudos sobre a torrefação oxidativa do BCA, pois a sua implementação nos sistemas de cogeração no setor sucroalcooleiro brasileiro, torna-se uma alternativa, a qual poderia aumentar a eficiência de geração, reduzir a poluição, assim como promover o aumento da participação da cana-de-açúcar na matriz energética.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a torrefação oxidativa do bagaço de cana-de-açúcar para geração de energia.

1.1.2 Objetivos específicos

- Determinar as propriedades físicas e químicas do bagaço de cana-de-açúcar;
- Executar os experimentos de torrefação em atmosfera inerte e oxidativa;
- Determinar os parâmetros de avaliação da torrefação;
- Caracterizar o bagaço de cana-de-açúcar torreficado.

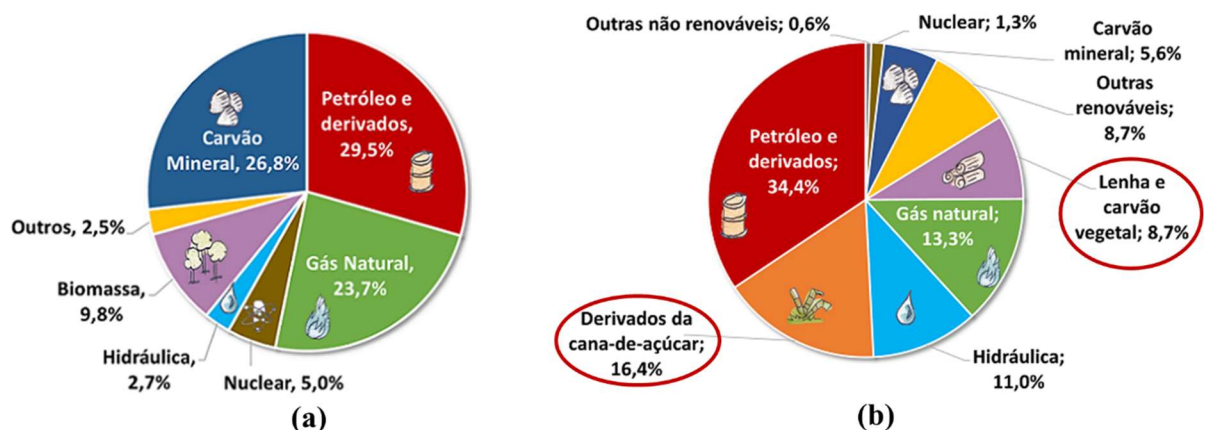
2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 BIOMASSA

Do ponto de vista energético entende-se por biomassa todos os recursos renováveis oriundos de matérias orgânicas, de origem animal ou vegetal, assim como aqueles resíduos gerados pela sua transformação a partir de processos naturais ou artificiais, os quais podem ser utilizados para geração de calor, eletricidade e/ou transformada em biocombustíveis (EPE, 2022; MME, 2020). A biomassa é considerada a quarta fonte de energia no mundo, tendo uma participação aproximada de 10% na matriz energética mundial conforme os reportes da agência internacional de energia (IEA, 2020).

A Figura 1 apresenta a matriz energética mundial e a brasileira. Observa-se que a matriz energética mundial (Fig 1a) depende principalmente de fontes não renováveis (carvão mineral, petróleo e gás natural), no entanto a matriz energética brasileira (Fig 1b) se destaca principalmente pelo uso significativo de fontes renováveis de energia que totaliza uma participação de 58,1%, porcentagem superior ao apresentado pela matriz energética mundial. Entre as fontes renováveis de energia, a biomassa tem uma participação de aproximadamente de 10% na matriz energética mundial e no caso da matriz energética brasileira, a biomassa tem uma participação de 25%, somando os derivados de cana-de-açúcar, lenha e carvão vegetal (EPE, 2022).

Figura 1 – Matriz Energética ano base 2021 (a) Mundial e (b) Brasil.

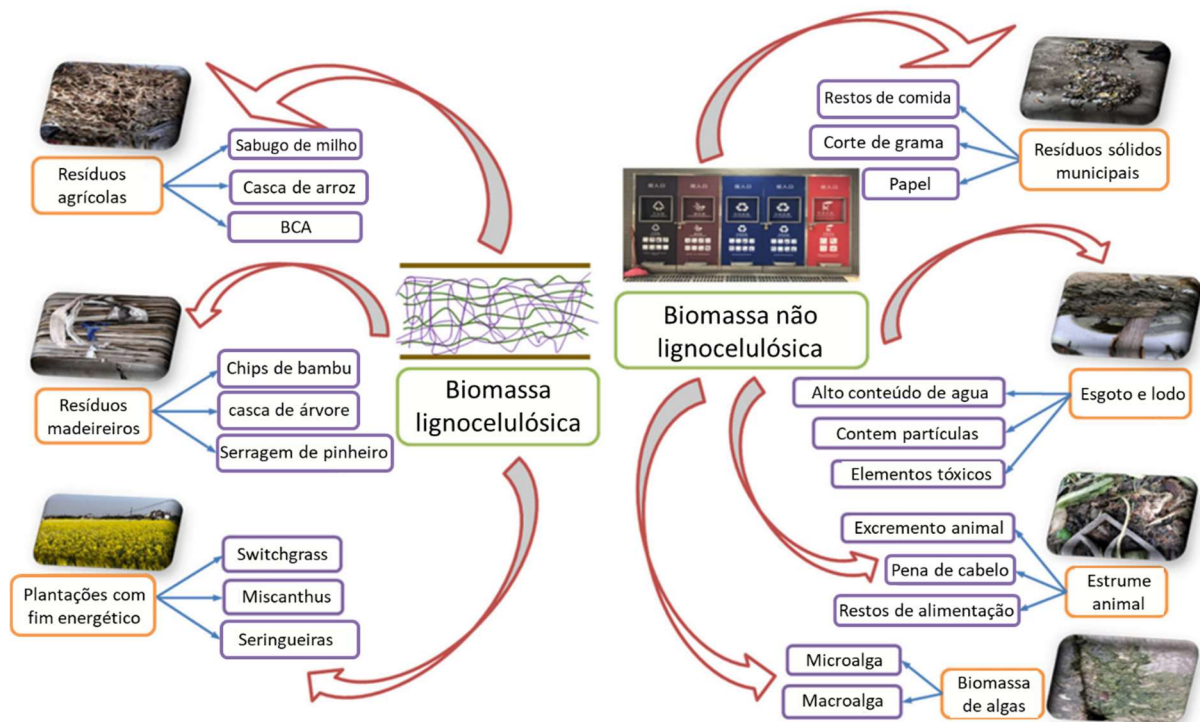


Fonte: Adaptado de EPE (2022)¹.

¹<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>

Na literatura há diversos trabalhos que apresentam diferentes tipos de classificações da biomassa, os quais consideram principalmente a sua composição e a sua origem. Lu *et al.* (2021) apresenta uma classificação da biomassa dividindo-a em dois grandes grupos, segundo a sua composição, sendo a biomassa lignocelulósica e a biomassa não-lignocelulósica (Figura 2). Entre ambos os tipos de biomassa, a lignocelulósica é a mais abundante da Terra com uma produção mundial estimada em 200 bilhões de toneladas por ano (Liang *et al.* 2020).

Figura 2 – Classificação dos principais tipos de biomassa.



Fonte: Adaptado de Lu *et al.* (2021).

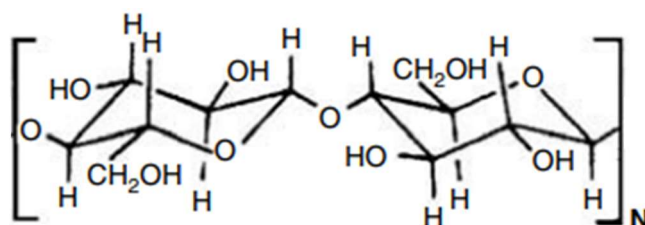
2.1.1 Constituintes da biomassa lignocelulósica

Os principais constituintes da biomassa lignocelulósica são a celulose, hemiceluloses e lignina. A concentração destes constituintes varia para cada biomassa lignocelulósica, considerando uma massa seca e livre de extrativos, entre 35 e 50% de celulose, 20 a 35% de hemiceluloses e 10 a 25% de lignina (Bajpai, 2021; Liang *et al.* 2020).

As biomassas lignocelulósicas apresentam diferentes composições dos seus constituintes o que outorga diferentes características físicas e químicas. A celulose é o biopolímero mais abundante na terra, sendo o principal componente da parede celular dos vegetais e compostos orgânicos. A celulose é um homopolímero altamente cristalino, que consiste em unidades de

D-anidro glucopirranose, Unidade de anidroglicose(AGU) e unidades de celobiose unidas por ligações β -1,4-D-glicosídicas. O anel radical médio de AGU na celulose contém C-2, grupo hidroxila de álcool secundário C-3 e grupo hidroxila de álcool primário C-6. A estrutura da celulose é apresentada na Figura 3. O número de unidades de AGU em uma molécula de celulose é referido como o grau de polimerização, na natureza o grau de polimerização da celulose normalmente é acima de 10000. Essas características fazem a celulose ter propriedades como ser insolúvel em água e ter uma alta resistência mecânica (Zhan *et al.* 2023; He *et al.* 2023; Laca *et al.* 2019).

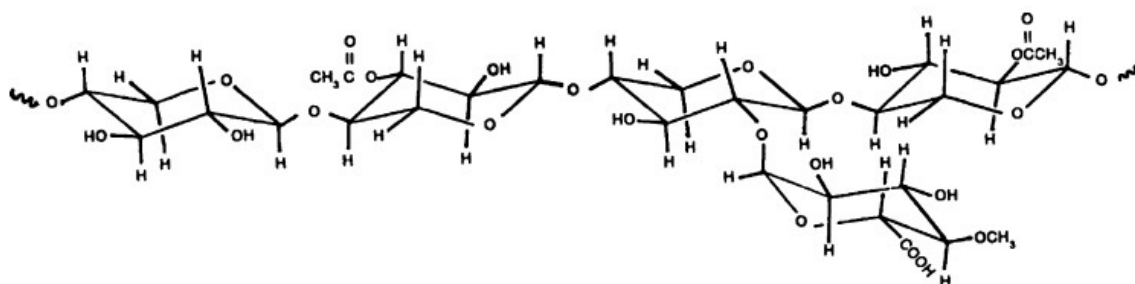
Figura 3 – Estrutura molecular parcial da celulose.



Fonte: Adaptado de Rowell *et al.* (2005).

As hemiceluloses também são componentes estruturais da biomassa. De forma geral, a concentração das hemiceluloses consiste em uma coleção de polímeros polissacarídeos com menor grau de polimerização que a celulose (100-200). As hemiceluloses são os componentes da biomassa com maior facilidade de serem removidos, isto é, devido a sua estrutura amorfa e ramificada, o que dá como resultado pouca resistência. As hemiceluloses são mais higroscópicas que outros componentes e facilmente hidrolisadas por ácidos. A Figura 4 exibe a estrutura molecular parcial de uma hemicelulose (Wang *et al.* 2023; Basu, 2018; Laca *et al.* 2019; Rowell *et al.* 2005).

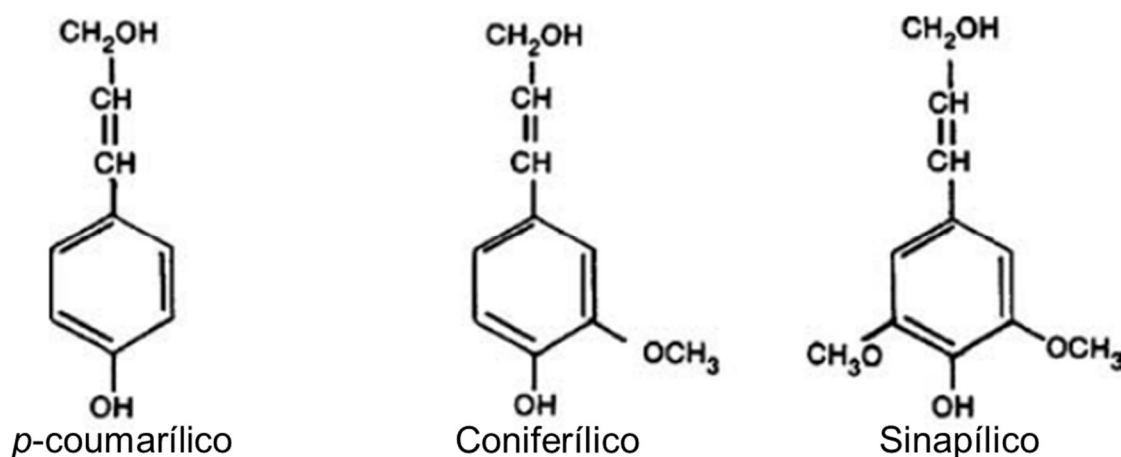
Figura 4 – Estrutura molecular parcial de O-acetil-4-O-metilglucuronoxilano.



Fonte: Adaptado de Rowell *et al.* (2005).

A lignina é uma das macromoléculas mais abundantes na Terra (superado apenas pela celulose). A lignina é um polímero aromático, amorfo, altamente complexo, constituído de unidades de fenil-propano. Os precursores da síntese da lignina são álcool-p-cumarílico, álcool coniferílico e álcool sinapílico (Figura 5) (Rowell *et al.* 2005). A lignina está distribuída por toda a parede celular secundária, com maior concentração na lamela média. Devido à diferença no volume da lamela média para a parede celular secundária, cerca de 70% da lignina está localizada na parede celular. Além dessas características também se destacam outras como seu alto poder calorífico e uma alta insolubilidade (Rowell *et al.* 2005; Hosseini, 2019; Basu, 2018).

Figura 5 – Estrutura molecular dos precursores da lignina.



Fonte: Adaptado de Rowell *et al.* (2005).

2.1.2 Propriedades físicas e químicas da biomassa lignocelulósica

A biomassa lignocelulósica é considerada uma alternativa potencial para o suprimento da demanda energética devido a que na sua composição há uma grande reserva de carbono, podendo chegar a ser um substituto parcial ou total dos combustíveis fósseis, no entanto, seu uso na produção de energia exhibe alguns desafios devido às propriedades físicas e químicas inerentes tais como um elevado teor de umidade, partículas heterogêneas em tamanho e forma, higroscopicidade, entre outros (Nguyen *et al.* 2019).

Essas propriedades limitam seu uso extensivo em grande escala, por exemplo, a baixa densidade energética torna seu transporte oneroso e não econômico, enquanto o elevado teor de umidade resulta em um alto consumo de energia, pela vaporização da água, durante os processos subsequentes de conversão termoquímica (Verdugo *et al.* 2022; Xiang *et al.* 2019).

A biomassa lignocelulósica apresenta uma característica hidrofílica, tendendo a absorver água criando um meio adequado para proliferação de bactérias e fungos provocando a sua degradação, dificultando seu armazenamento a longo prazo. A sua natureza fibrosa provoca um elevado consumo de energia durante a sua moagem. Assim, essas propriedades heterogêneas da biomassa dificultam o projeto de reatores e o controle do processo (Verdugo *et al.* 2022; Xiang *et al.* 2019).

As biomassas exibem diferentes comportamentos térmicos, isto é, devido aos teores de celulose, hemicelulose e lignina, os quais são diferentes de uma biomassa para outra e até mesmo considerando diferentes partes da planta. Segundo Wild *et al.* (2014), a decomposição da hemicelulose ocorre entre 200 e 300°C, da celulose entre 300 e 400°C e a lignina se decompõe mais lentamente, numa faixa mais ampla, entre 190 e 900°C. No entanto sua decomposição está associada a produtos diferentes, por exemplo, celulose e hemicelulose são associadas a produção de material volátil, no entanto, a lignina se associa com o produto sólido (Blasi, 1993).

2.2 CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar é uma biomassa lignocelulósica cultivada em mais de 80 países e os subprodutos, tais como bagaço, palha, torta de filtro, entre outros; obtidos no processo de produção de açúcar e álcool representam um grande potencial de biomassa (Pedroso *et al.* 2017). No ano de 2021, a Food and Agriculture Organization (FAO) reportou que a produção de cana-de-açúcar no mundo foi de aproximadamente 1.859 milhões de toneladas, desse total um 38,5% correspondem ao Brasil (715 milhões de toneladas). Além do Brasil, Índia (405 milhões de toneladas), China (106 milhões de toneladas), Paquistão (88 milhões de toneladas), e Tailândia (66 milhões de toneladas) vêm como importantes países produtores da cana-de-açúcar. O Brasil produz mais de um terço da cana-de-açúcar no mundo, sendo cultivada principalmente para produção de etanol, assim do processamento da cana se geram diversos resíduos, entre eles o bagaço (EPE, 2022).

2.2.1 Bagaço de cana-de-açúcar na produção de energia

O bagaço de cana-de-açúcar (BCA) é um resíduo lignocelulósico da indústria sucroalcooleira usado como combustível para geração de energia. Ele se compõe de 40-50% de celulose, 20-30% de hemicelulose, 20-25% de lignina e 1,5-3% de cinzas (Varma *et al.* 2017).

O BCA exibe um poder calorífico inferior considerável, com um valor entre 15 e 19 MJ/kg em base seca, além disso, apresenta uma elevada concentração de material volátil, ambas características indicam seu potencial como combustível. Também apresenta baixos teores de cinzas e enxofre, quando comparado ao carvão mineral (Miranda *et al.* 2021).

Segundo os dados da FAO (2020), a produção mundial de cana-de-açúcar atingiu um total de 1.870 milhões de toneladas e como apontado por Khalil *et al.* (2021), onde cada tonelada de cana-de-açúcar gera cerca de 270 kg de bagaço, consegue-se estimar que a safra mundial em 2020 produziu aproximadamente 505 milhões de toneladas de bagaço de cana-de-açúcar.

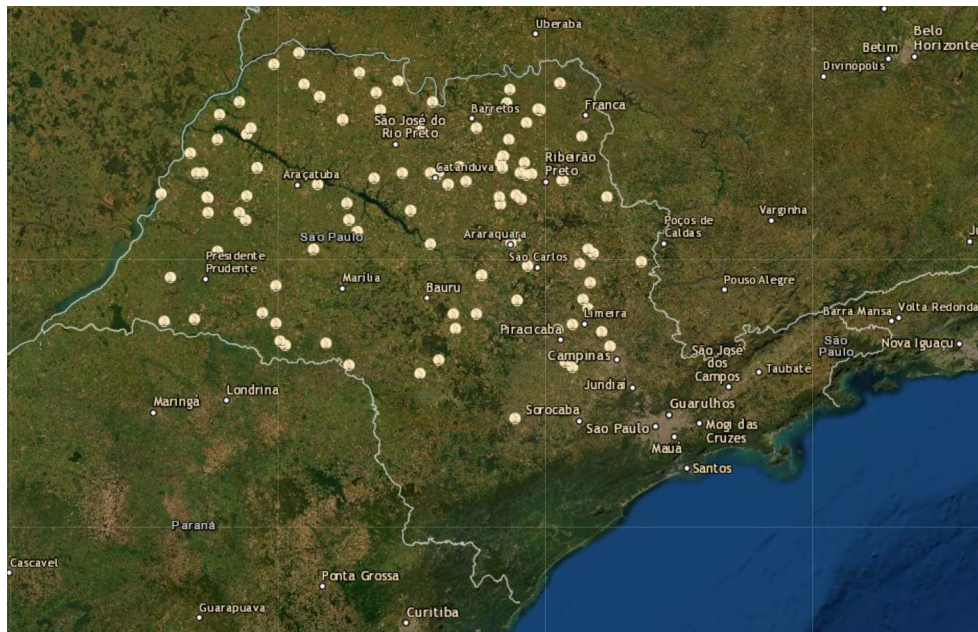
O BCA é uma matéria-prima com grande disponibilidade nos países onde a produção de cana-de-açúcar é ampla, o bagaço desempenha um papel importante suprimindo as necessidades energéticas de países em desenvolvimento, tais como a Índia, Brasil, entre outros (Miranda *et al.* 2021; Varma *et al.* 2017). No Brasil, o BCA é utilizado como combustível nas usinas termelétricas para geração de calor e energia elétrica. Segundo o mapa fornecido pela (EPE) no ano de 2022, cerca de 233 usinas termelétricas de BCA se encontravam ativas no Brasil fornecendo aproximadamente 10,5 GW. Como mostrado na Figura 6, a maioria das usinas se concentram no Sudeste do país e um pequeno número no Nordeste, do total, 113 usinas se encontram no estado de São Paulo (Figura 7) e são responsáveis pela produção de 51% da potência total produzida por usinas de BCA no Brasil.

Figura 6 – Distribuição de usinas termelétricas a base de bagaço de cana-de-açúcar no Brasil.



Fonte: Adaptado da EPE (2022).

Figura 7 – Distribuição de usinas termelétricas a base de bagaço de cana-de-açúcar no estado de São Paulo



Fonte: Adaptado da EPE (2022).

Do total de BCA gerado nas indústrias sucroalcooleiras, aproximadamente 90% é queimado em caldeiras para produção de vapor e 10% permanece disponível para diversos usos, como alimentação animal, entre outros (Almeida *et al.* 2022). No entanto, a queima de BCA para produção de vapor apresenta diversos desafios, os quais podem ser melhorados. Por exemplo, a produção de cinzas voantes (*fly ash*) que apresentam um risco à saúde humana e criam um problema de gerenciamento de resíduos no local da usina. O elevado teor de material volátil exige uma câmara de combustão de maior tamanho, provocando um alto custo capital, custos de operação e manutenção respectivamente (Miranda *et al.* 2021; Dias *et al.* 2013). Também, o consumo de vapor e as eficiências dos componentes utilizados no processo de produção de energia a partir da queima de BCA limita a eficiência em 26% (Varma *et al.* 2017).

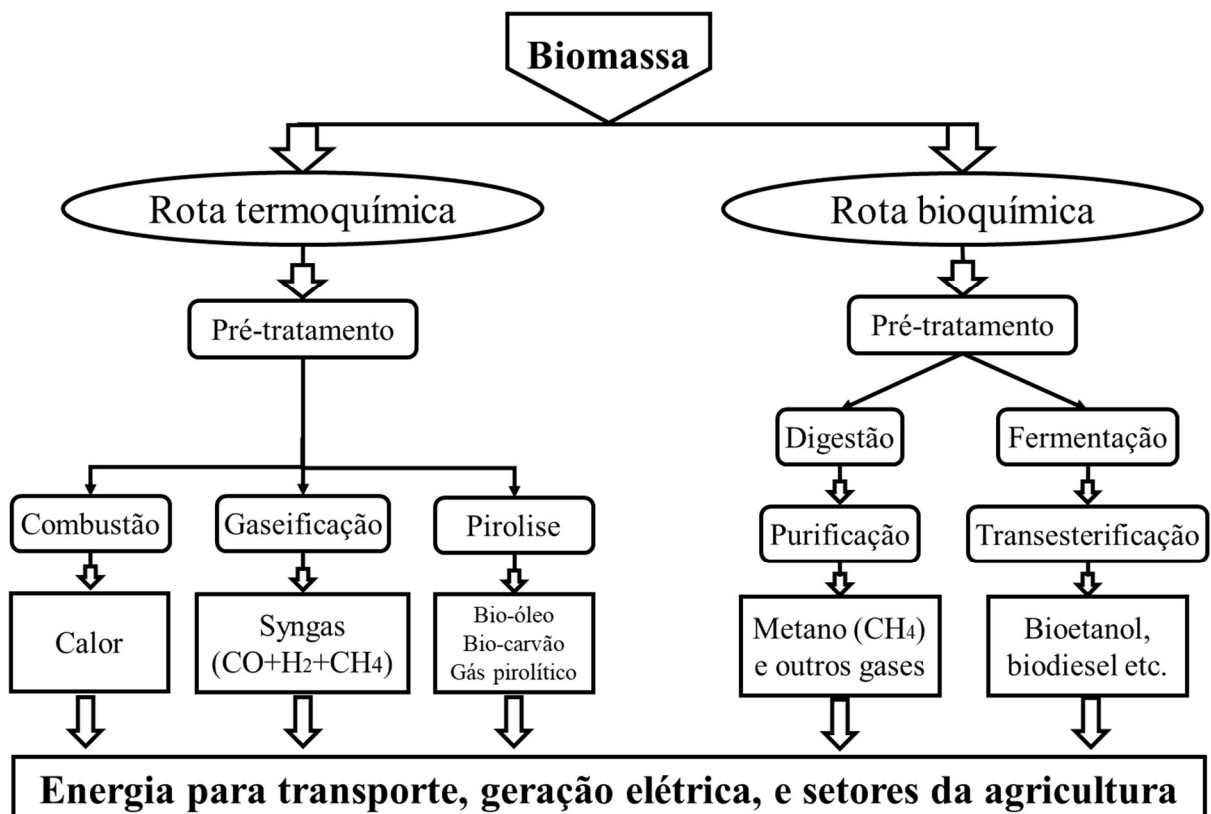
Com os desafios já comentados, demonstra-se que há a necessidade de processos mais eficientes para a utilização do BCA. Existem diversas tecnologias de pré-tratamento (Secagem, explosão de vapor, tratamento químico, torrefação, densificação mecânica, entre outros), que visam melhorar as propriedades da biomassa (teor de umidade, poder calorífico, entre outros), este tipo de tecnologias tornaria mais eficiente o uso do BCA como combustível.

2.3 ROTAS DE CONVERSÃO DE BIOMASSA

A disposição final da biomassa na indústria não é sempre a sua queima direta, a qual é a mais comum (Basu, 2018). Existem diversas rotas de conversão (Figura 8), principalmente as rotas termoquímica e bioquímica. Dentre essas, a primeira tem ganhado maior popularidade devido a sua rapidez e eficiência quando comparada com a segunda (Ong *et al.* 2021).

As características inerentes da biomassa tais como, a baixa densidade energética, partículas de tamanho e formato irregular, entre outras, dificultam sua implementação em grande escala. No entanto, essas características podem ser melhoradas através da implementação de processos de pré-tratamento (densificação mecânica, torrefação, tratamento químico, explosão de vapor, entre outros). Esses processos podem melhorar características específicas da biomassa definindo a rota de conversão de biomassa mais adequada para um eficiente aproveitamento (Wagle *et al.* 2022).

Figura 8 – Rotas de conversão de biomassa.



Fonte: Adaptado de Chintala *et al.* (2018).

2.3.1 Processos de conversão termoquímica

A rota de conversão termoquímica da biomassa tem recebido maior atenção que outras, devido a sua velocidade e maior eficiência (Ong *et al.* 2021). Os processos de conversão termoquímica são genericamente definidos como a transformação química de um material através da sua exposição ao calor, a produção de energia térmica é o principal objetivo para esta rota de conversão que tem três processos sendo, combustão, pirólise e gaseificação (Basu, 2018).

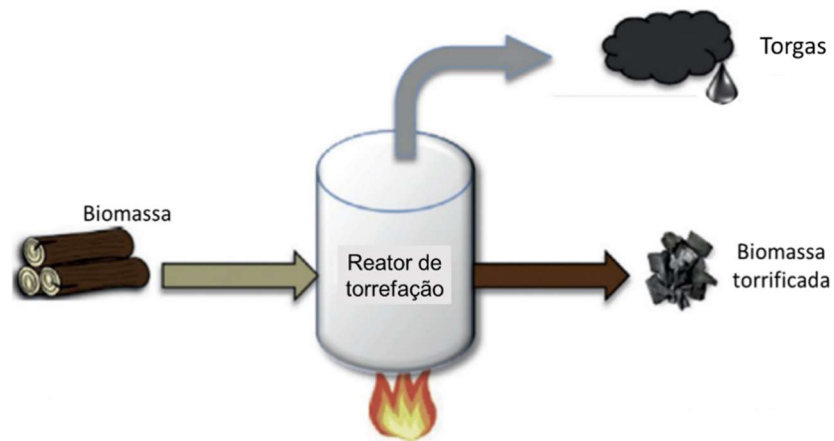
A combustão é um processo exotérmico usado para produção de calor, através da queima de biomassa. A pirólise é um processo endotérmico realizado em um ambiente carente de oxigênio, onde a biomassa é aquecida até decompor as moléculas de hidrocarbonetos da biomassa em moléculas menores. A pirólise tem como objetivo a produção de combustíveis energeticamente densificados quando comparados à biomassa de origem. Entretanto, a pirólise está orientada principalmente à produção de bio-óleo (Basu, 2018; Ramos *et al.* 2022). A gaseificação é um processo que converte um combustível sólido ou líquido em um gás combustível. Mediante uma reação endotérmica as moléculas de biomassa polimerizada de cadeia longa se decompõem dando como resultado um gás de síntese, composto principalmente por hidrogênio, monóxido de carbono e metano, na presença de agentes gaseificantes como ar, vapor, entre outros (Basu, 2018; Aliyu *et al.* 2021; Elgarahy *et al.* 2021).

2.4 TORREFAÇÃO

A Figura 9 esquematiza o processo de torrefação de biomassa, o qual pode ser definido como o processo de pré-tratamento termoquímico da biomassa realizado em um meio inerte ou carente de oxigênio e em uma faixa específica de temperaturas (entre 200 e 300°C). A torrefação tem como objetivo melhorar as características desvantajosas da biomassa, tais como baixa densidade energética, elevado teor de umidade, baixo poder calorífico, entre outros.

A torrefação da biomassa tem como resultado principalmente uma biomassa torrificada com um poder calorífico maior que a biomassa de origem, um baixo teor de umidade, uma natureza hidrofóbica, proporcionando resistência ao ataque de fungos e, além disso, quando queimada gera uma menor formação de fumaça, devido à redução do teor de material volátil. Também é gerada uma fração volátil conhecida como gases de torrefação (TORGAS), o qual é usado como combustível para gerar calor no próprio processo de torrefação (Basu, 2018; Filho *et al.* 2023).

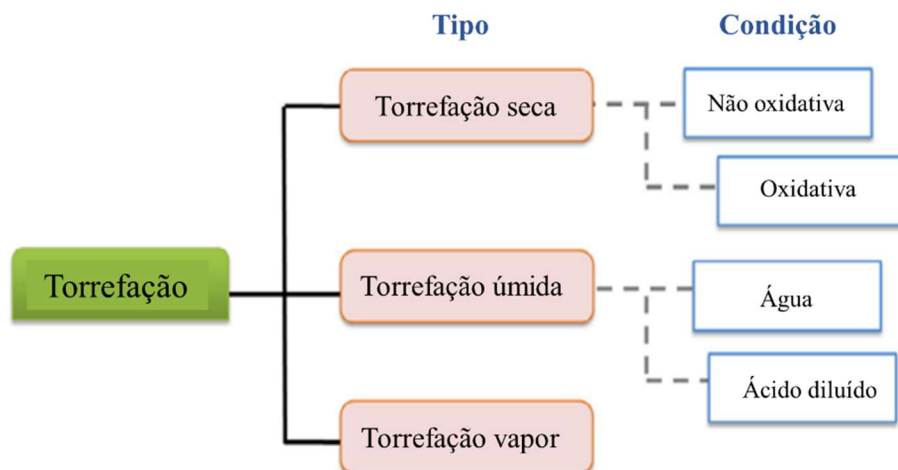
Figura 9 – Esquema da torrefação de biomassa.



Fonte: Adaptado de Basu (2018).

De acordo com Chen *et al.* (2021), a torrefação de biomassa pode ser classificada em três tipos sendo a torrefação seca, úmida e ao vapor (Figura 10). Na torrefação seca, a atmosfera (não oxidativa ou oxidativa) dentro do reator é obtida mediante a injeção de um gás de arraste seco. Uma torrefação não oxidativa usa frequentemente gás nitrogênio seco, e no caso da torrefação oxidativa se considera o uso de um gás de arraste seco contendo uma concentração de oxigênio geralmente inferior à concentração presente no ar. Na torrefação úmida, a atmosfera é criada pela adição de um líquido (água ou ácido diluído) que envolve a biomassa. Na torrefação ao vapor, a atmosfera dentro do reator é criada pela injeção de vapor superaquecido, o qual desenvolve duas funções, sendo usado como gás de arraste e como fonte de calor (Dai *et al.* 2019; Nwabunwanne *et al.* 2021; Shehzad *et al.* 2020; Chen *et al.* 2021).

Figura 10 – Classificação da torrefação.

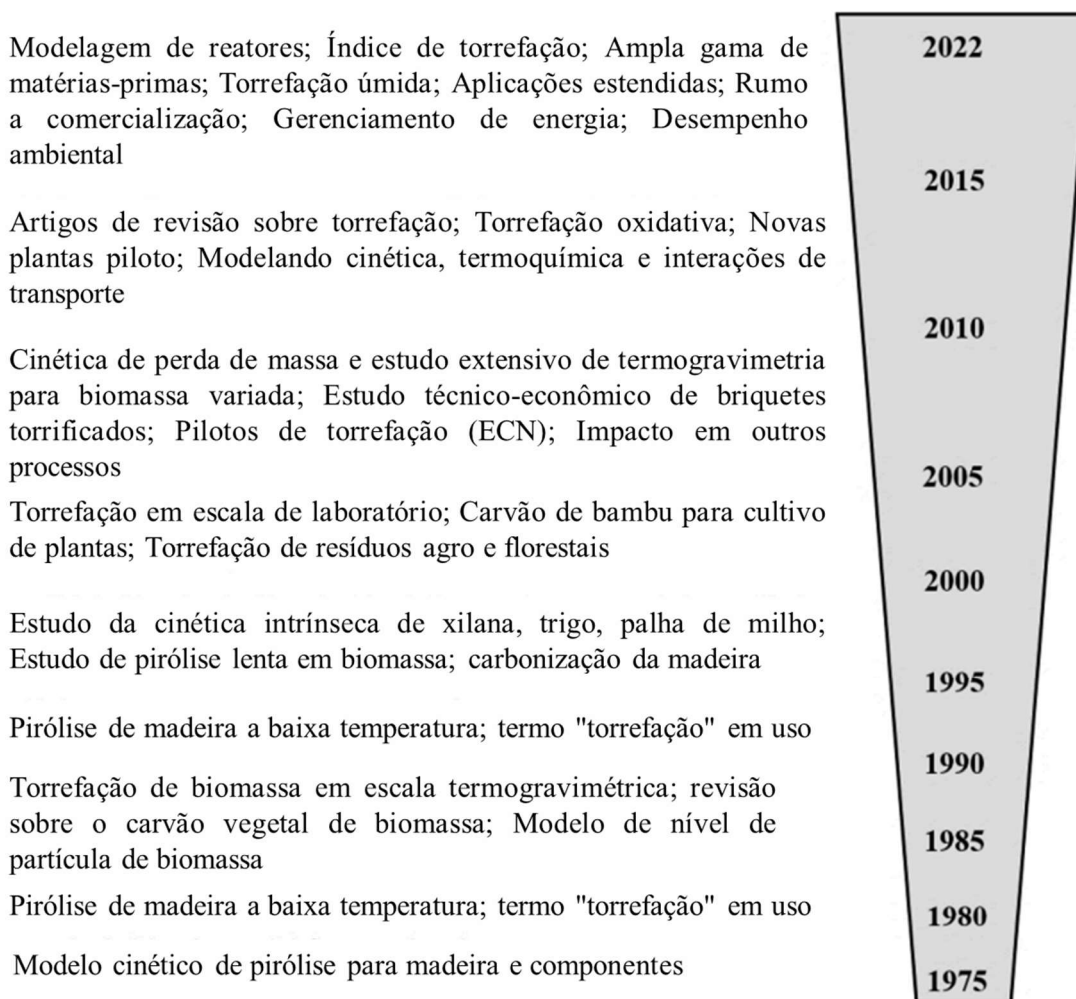


Fonte: Adaptado de Chen *et al.* (2021).

2.4.1 Estado da arte da torrefação

O termo torrefação tem ganhado popularidade com o passar dos anos e a sua pesquisa focou-se em diferentes tópicos durante os anos, mas ainda não atingiu uma escala industrial visível. Aspectos como desafios técnicos, análises econômicas, entre outros, são preocupações que ainda estão vigentes, mas o interesse no estudo da torrefação é inegável. Na Figura 11 apresenta-se os principais tópicos de pesquisa sobre torrefação estudados ao longo dos anos (Thengane *et al.* 2022).

Figura 11 – Pesquisas na área de torrefação nas últimas quatro décadas.



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

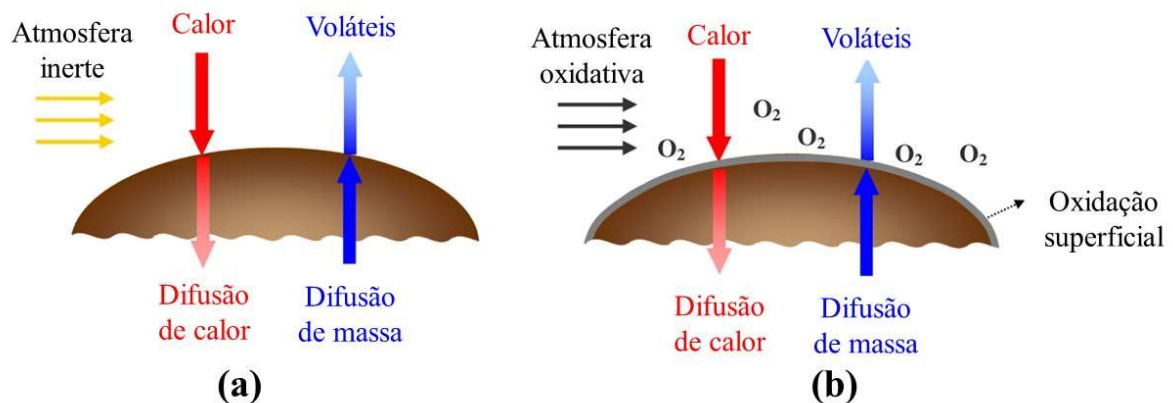
Com o passar do tempo houve uma transição gradual entre os diversos tópicos de pesquisa, que vão desde um estudo experimental até projeto em escala industrial. Desde 1975 até o ano 2000 foi uma etapa de conhecimento do processo, de definição de parâmetros e

avaliação do comportamento. Entre 2005 e 2010 se visa a sua implementação na escala de laboratório e realizaram-se estudos focados na análise econômica e desde 2015 as pesquisas estão direcionadas no melhoramento do processo, estudando novos tipos como a torrefação oxidativa ou diferentes tipos de reatores. A partir desse ano, iniciaram-se os estudos sobre a torrefação oxidativa e até a atualidade ainda se tem biomassas com poucos ou quase nenhum artigo avaliando a sua torrefação para fins energéticos.

2.5 TORREFAÇÃO SECA OXIDATIVA

A torrefação seca oxidativa é um processo complexo combinado de oxidação, carbonização e volatilização, no qual a torrefação e a oxidação ocorrem em paralelo e não se relacionam entre si (Olugbade *et al.* 2020). Normalmente o aquecimento é por meio de um gás quente ou por aquecimento indireto. Opera em temperaturas de 200 – 300 °C, com tempos de residência que variam de 30 até 80 min, uma concentração de oxigênio de 0 – 21% e diversas vazões de gás de arrasto. A Figura 12 exibe uma representação dos principais mecanismos que acontecem sobre a partícula de biomassa durante a torrefação.

Figura 12 – Torrefação na partícula de biomassa (a) inerte; (b) oxidativa.



Fonte: Adaptado de Chen *et al.* (2013).

A Figura 11a esquematiza a torrefação em meio inerte de uma partícula de biomassa. Pode-se observar os dois principais mecanismos que participam durante a torrefação, a transferência de calor por condução dentro da partícula e a transferência de massa de voláteis através da difusão de massa. A Figura 11b representa a torrefação oxidativa de uma partícula de biomassa, a qual exibe os mesmos fenômenos de transferência de calor e massa que na

torrefação em meio inerte, no entanto, na superfície da partícula existe uma oxidação superficial devido à presença de oxigênio, dando como resultado a formação de uma camada de cinzas.

Devido à natureza endotérmica da torrefação inerte se gera um consumo de energia maior quando comparado a uma torrefação oxidativa, onde o oxigênio presente oxida parte da biomassa gerando uma quantidade de calor interna, o que reduz o consumo de energia. Visando a sustentabilidade energética do processo, a torrefação seca oxidativa tem sido foco de diferentes trabalhos, onde foi estudado seu comportamento com diversas biomassas (Thengane *et al.* 2020; Kota *et al.* 2020).

Na torrefação seca oxidativa podem ser usados diversos tipos de gases como gás de arrasto, por exemplo o gás de exaustão de uma combustão, o qual contém uma concentração de oxigênio (Liu *et al.* 2021a; Liu *et al.* 2021b), também pode ser uma mistura entre ar e uma corrente de gás nitrogênio puro, procurando reduzir a concentração de oxigênio do ar atmosférico (Li *et al.* 2021; Rousset *et al.* 2012; Riaz *et al.* 2022).

2.5.1 Torrefação seca oxidativa de diversas biomassas

A literatura apresenta diversos trabalhos avaliando o potencial da torrefação seca oxidativa para melhoramento das propriedades físicas e químicas de diversas biomassas para geração de energia como observado na Tabela 1.

Tabela 1 – Artigos sobre torrefação oxidativa de diversas biomassas.

Autor	Biomassa	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Gás de arrasto	Teor de oxigênio (%)	Vazão
Uemura <i>et al.</i> (2017)	Cachos vazios de palma azeiteira	200, 250, 300	30	Gases de exaustão	8,1 - 8,9	5 L/min
Zhang <i>et al.</i> (2019)	Casca de noz	250, 300	10, 20, 30	N ₂ +O ₂	0,5,15,21	300 ml/min
Chen <i>et al.</i> (2020)	Casca de arroz	220, 260, 300	30	N ₂ +O ₂	0,2,5,10,15	300 ml/min
Liu <i>et al.</i> (2021)	Palha de milho	275 - 375	20	N ₂ +CO ₂ +O ₂	3,0 - 7,0	3 L/min
Zhang <i>et al.</i> (2022)	Casca de arroz	220, 270, 300	30 - 60	Ar+O ₂ +C O ₂ +H ₂ O	6	2 L/min
Cheng <i>et al.</i> (2022)	Talo de algodão	220, 260, 300	30	Gases de exaustão	0,3,6,10,21	0,5 L/min
Riaz <i>et al.</i> (2022)	Pellets de madeira	250, 275, 300	30	N ₂ +O ₂	5	250 ml/min

Fonte: Produção do próprio autor.

Pode-se observar que há uma significativa quantidade de trabalhos sobre torrefação oxidativa usando diferentes biomassas, isto devido as diversas biomassas usadas no mundo e as necessidades de aproveitar os resíduos. Os estudos apresentados na literatura exibem resultados favoráveis na utilização de torrefação oxidativa, o que reforça a ideia da sua implementação no futuro, no entanto, devido a que cada biomassa tem características e comportamentos diferentes, os parâmetros ótimos de torrefação mudam de uma à outra, fazendo imperativo o estudo da torrefação de BCA visando sua implementação futura.

2.5.2 Torrefação seca oxidativa de bagaço de cana-de-açúcar

O bagaço de cana-de-açúcar é uma biomassa com potencial energético, razão pela qual é utilizada para a produção de energia, no entanto exibe algumas características desvantajosas devido a sua natureza. Por isso o estudo do melhoramento das suas propriedades é muito importante, porém, a literatura apresenta escassos trabalhos sobre a torrefação oxidativa de bagaço de cana-de-açúcar para fins energéticos.

Conag *et al.* (2017) analisaram o efeito do tempo e da temperatura na torrefação oxidativa do BCA. As temperaturas e tempos avaliadas foram de 250 - 350°C e 0-75min. Os resultados demonstram que a temperatura e o tempo afetam significativamente os rendimentos (mássico e energético). Além disso, o BCA torreficado apresentou uma melhora na higroscopicidade, o que dá maior resistência à degradação bacteriana, permitindo a estocagem segura. Finalmente, os autores concluem que o uso de BCA como matéria-prima na produção de biomassa torreficada pode ser adotado em áreas onde estes são produzidos em grandes volumes.

A importância do BCA na matriz energética é inegável, igual que as desvantagens inerentes ao mesmo, por esse motivo há uma necessidade de implementar formas de melhorar essas propriedades limitantes do seu uso. Vendo a falta de estudos sobre a torrefação oxidativa do BCA é notória a necessidade de continuar avaliando este processo de pré-tratamento térmico visando melhorar as propriedades físico-químicas do BCA.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico serão apresentados a biomassa, a sua preparação, as técnicas de caracterização, assim como a bancada experimental utilizada para o estudo da torrefação seca oxidativa do BCA.

3.1 BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

O BCA (Figura 13) utilizado neste trabalho foi fornecido pela destilaria Iracema da cidade de Itaí, interior do estado de São Paulo. Por ser um subproduto industrial possui características particulares, por exemplo tem uma estrutura fibrosa, o qual o torna bastante coesivo, tamanho e forma irregular e uma umidade elevada devido a adição de água durante a extração dos açúcares.

Figura 13 - Bagaço de cana-de-açúcar *in natura*.



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E QUÍMICA

Neste tópico são apresentadas as técnicas utilizadas para a caracterização química do BCA, as quais permitiram uma posterior análise do efeito da torrefação nas propriedades das biomassas torrificada.

3.2.1 Umidade

Para determinar o teor de umidade no material recém-chegado da indústria utilizou-se a norma ASTM E871-82.

3.2.2 Análise composicional

O teor de extrativos totais foi baseado na norma TAPPI T 264 cm-97. Com a biomassa livre de extrativos, foi usado o método clorito para determinar o teor de holocelulose. Pelo somatório determinou-se o teor de lignina. Tendo obtido o teor das holoceluloses, determina-se o teor de celulose segundo a norma T 203 cm-99. O teor de hemicelulose é obtido por diferença de massa, entre holoceluloses e celulose.

3.2.3 Análise imediata

A análise imediata foi realizada em triplicata e seguindo a seguinte ordem, o teor de umidade foi determinando segundo a norma ASTM E871-82, depois o teor de material volátil foi determinado seguindo a norma ASTM D3175-20 e finalmente o teor de cinzas foi usando a norma ASTM E1755-01. O teor de carbono fixo foi determinado pela diferença entre as variáveis obtidas e o total.

3.2.4 Poder Calorífico Superior (PCS)

O poder calorífico superior foi determinado usando um calorímetro IKA C5000 (Figura 14). Para a determinação do PCS das diferentes amostras de BCA *in natura* e BCA torreficados, se utilizaram aproximadamente 0,5000 g de amostra previamente secadas a 105°C por 48 horas. O PCS foi realizado em triplicata usando o valor médio como resultado.

Figura 14 – Calorímetro IKA C5000



Fonte: Elaborado pelo autor

3.3 PREPARAÇÃO E AMOSTRAGEM DO BCA

Para a realização dos experimentos de torrefação, o BCA passou pela operação de secagem em uma estufa a uma temperatura de 105 ± 3 °C durante um período de 24 horas, para eliminar as variações geradas pela umidade e para diminuir o teor de umidade. Com a finalidade de uniformizar a granulometria do BCA passou-se por uma operação de moagem, usando um moinho de facas (Figura 13a) e finalmente por um peneiramento para obter uma faixa específica de tamanho, a qual realizou-se em um agitador eletromagnético de peneiras (Figura 13b). A granulometria definida foi de 500 - 850 μm , um menor tamanho de partícula poderia conter finos que gerariam variações nos resultados e um tamanho maior dificultaria a manipulação da biomassa nos experimentos.

Figura 15 - Equipamentos para preparação do BCA (a) Moinho de facas - Marconi; (b) Agitador eletromagnético



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4 CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

As variáveis do processo de torrefação, tais como a massa de BCA, faixa granulométrica, tempo e vazão do gás de arraste foram mantidas constantes. A massa de BCA usada em todos os experimentos foi de aproximadamente 100 g. A granulometria foi mantida entre 500 e 850 μm . O tempo de torrefação foi de 30 minutos após atingida a temperatura de processo e a vazão

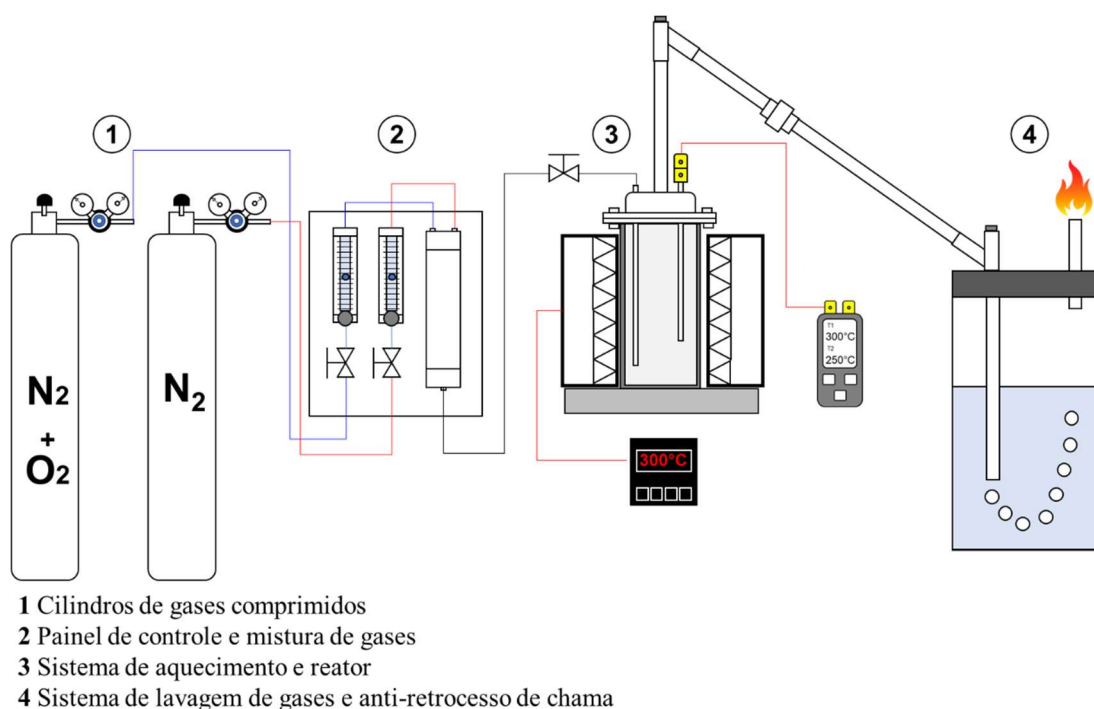
do gás de arrasto foi mantida em 100 mL/min. A concentração de oxigênio no gás de arrasto foi variada em 0, 10, 20 %. As temperaturas foram variadas em 200, 220, 240, 260, 280 e 300 °C. Todos os ensaios foram realizados em triplicata para garantir a confiabilidade dos resultados.

3.5 BANCADA EXPERIMENTAL DE TORREFAÇÃO DE BIOMASSA

Nesse trabalho foi projetada e desenvolvida uma bancada experimental (Figura 14) para o estudo da torrefação seca da biomassa em atmosfera inerte e oxidativa. Um reator cilíndrico de 10 cm de diâmetro e 25 cm de altura com volume aproximado de 2,8 L foi construído. O reator tem um ponto de injeção de gases e conta com um poço termométrico para o controle da temperatura de torrefação. Para todos os experimentos a vazão do gás de arraste foi previamente ajustada a 100 mL/min, para misturar os gases se utilizou um sistema de controle com dois rotômetros e um misturador estático de gases para garantir a concentração de oxigênio requerida.

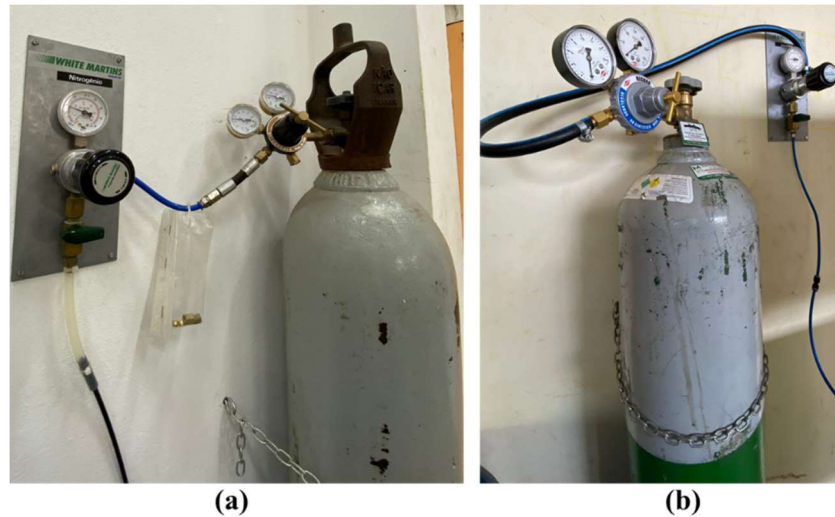
A fonte de aquecimento usada para os experimentos foi uma resistência de tipo coleira, o reator conta com uma saída para o TORGAS resultante o qual passa por um sistema lavador de gases para evitar a exposição a substâncias orgânicas até finalmente ser queimada, além disso tem como função adicional evitar o retorno da chama que se produz no final do sistema onde se queimara o gás produzido.

Figura 16 – Bancada experimental de torrefação seca de biomassa.



Os cilindros (Figura 17) contêm os gases utilizados como gás de arrasto, na Figura 17a temos o nitrogênio industrial com uma pureza de 98%, na Figura 17b o cilindro contém ar sintético medicinal com uma composição de 20% de oxigênio e 80% de nitrogênio.

Figura 17 – Cilindros de gases comprimidos (a) Nitrogênio, (b) Oxigênio.



Fonte: Elaborado pelo autor

O sistema de mistura de gases (Figura 18) está conformado por rotômetros para ajustar a vazão volumétrica do gás e através de um misturador estacionário se obterá a mistura de ar e nitrogênio desejada 0% e 20% foi usado só o cilindro de Nitrogênio e Ar respectivamente, para fazer a mistura foi definida uma vazão de 50 mL/min de Ar e 50 mL/min de Nitrogênio.

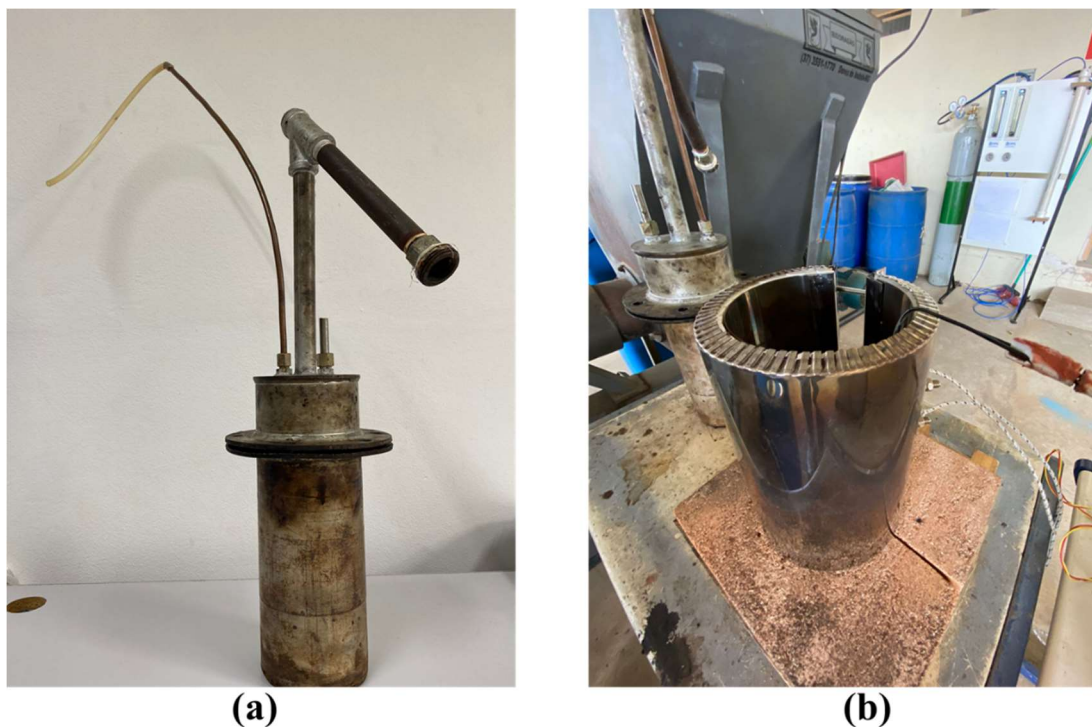
Figura 18 – Painel de controle e mistura de gases.



Fonte: Elaborado pelo autor

O reator (Figura 19a) consta de um termopozo para medir a temperatura do processo, de um tubo de injeção do gás de arrasto e de um tubo para a saída do material volátil, a coleira (Figura 19b) encontrasse acima de uma placa isolante e nas paredes externas contam com uma capa de fibra cerâmica para isolamento externo, para manter uma temperatura estável o controle de temperatura foi feito com uma medição na cara interna da coleira, por esse motivo foram adotados dois pontos de controle, uno para controlar o aquecimento e outro para controlar o processo de torrefação, já que a biomassa tem um comportamento particular .

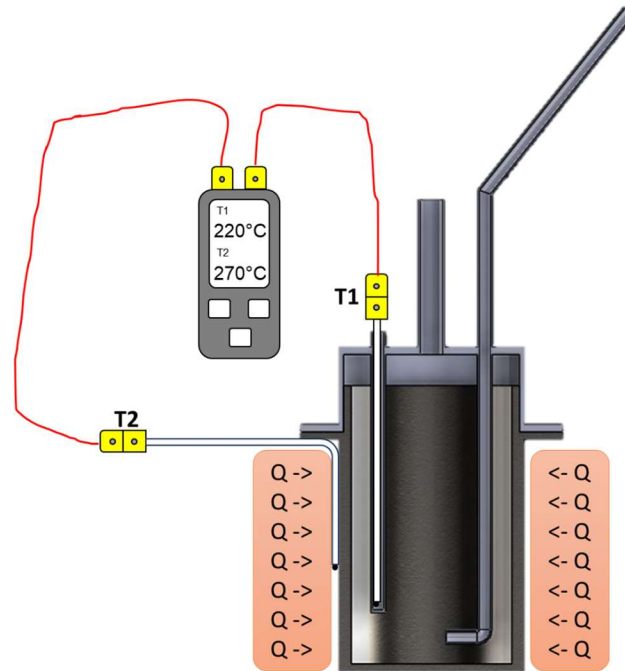
Figura 19 – Sistema de aquecimento (a) Reator de torrefação; (b) Coleira de aquecimento



Fonte: Elaborado pelo autor

O desenvolvimento do projeto do reator apresentou diversos desafios na construção e desenho, dentre eles, um dos mais notório foi a definição de um ponto de controle de temperatura, motivo pelo qual teve-se que definir dois pontos de controle (Figura 20), devido a que se o controle se faz só na parte interna do reator, a coleira ia experimentar uma sobrecarga, já que tem que transferir o calor da coleira ao centro o qual demanda um tempo. Além disso, se o controle se faz só na parte externa, o processo não atingiria a temperatura esperada dentro do reator, já que existe um delay e uma perda de calor devido a fatores externos. No entanto, tendo os dois pontos de controle foi possível encontrar o delay e a temperatura adequada de operação para a temperatura que se queria atingir, por exemplo, para obter uma temperatura de processo de 220 °C, a resistência externa deve ter um valor de 270 °C.

Figura 20 – Diferencias de temperatura nos pontos de controle.



Fonte: Elaborado pelo autor

O sistema de anti-retrocesso de chama (Figura 21) está composto de um cilindro de 50 litros com água, para estabelecer a altura determinada de água calculou-se a pressão gerada pela coluna de água, assim foi ajustada a pressão do gás de arrasto (10 PSIG).

Figura 21 – Sistema de lavagem e anti-retrocesso de chama.



Fonte: Elaborado pelo autor

Ao final do experimento, o reator foi resfriado até uma temperatura inferior a 150°C para evitar a autoignição do BCA torreficado durante a sua descarga. O balanço de massa do processo de torrefação foi realizado usando a equação (1), com a massa inicial do BCA e a massa final de BCA torreficado, determinou-se a massa de TORGAS gerado.

$$m_{BCA} = m_{BCA \text{ torreficado}} + m_{TORGAS} \quad (1)$$

3.6 PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DA TORREFAÇÃO SECA OXIDATIVA DO BCA

Na torrefação são determinados alguns parâmetros, os quais permitem avaliar o desempenho do processo, esses são os rendimentos mássico e energético, assim como o fator de melhoramento.

Rendimento mássico (RM): É um dos parâmetros mais importantes na torrefação e representa a quantidade de massa que não volatilizou durante o processo de torrefação. O rendimento mássico foi definido como a razão entre a massa do produto torreficado e a massa inicial da biomassa, equação 2 (Leontiev *et al.* 2019).

$$RM (\%) = \frac{\text{massa de biomassa torreficada}}{\text{massa de biomassa inicial}} \times 100\% \quad (2)$$

Fator de melhoramento (FM): O objetivo da torrefação é melhorar as principais características da biomassa *in natura*, uma delas a valorização do PCS, por isso a densificação energética é definida como a razão entre o PCS da biomassa torreficada e o PCS da biomassa *in natura*, equação 3 (Islamova *et al.* 2022).

$$FM = \frac{PCS \text{ biomassa torreficada}}{PCS \text{ biomassa in natura}} \quad (3)$$

Rendimento energético (RE): Para avaliar a quantidade de energia retida na biomassa torreficada em comparação com a biomassa *in natura* é calculada a razão do produto entre o rendimento mássico e o fator de melhoramento por meio da equação 4 (Korshunov *et al.* 2020).

$$RE (\%) = RM \times FM \quad (4)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico, serão apresentados os resultados da torrefação seca em condição inerte e oxidativa do BCA. Além disso, será apresentada uma breve discussão referente ao reator de torrefação desenvolvido para realizar este trabalho.

4.1 PREPARAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO BCA

4.1.1 Preparação do BCA

O bagaço de cana-de-açúcar (BCA) depois da extração do caldo apresenta um teor de umidade entre 49 e 51% (Santos *et al.* 2013). Neste trabalho, o teor de umidade do BCA quando recepcionado resultou em 43%, dessa forma a biomassa foi previamente secada ao ar visando reduzir o teor de umidade abaixo de 10% para evitar a sua degradação bacteriana. Em termos de tamanho e forma, as partículas de BCA demonstraram ser muito irregular e possuir uma natureza fibrosa, provocando que as partículas de BCA se aglomerem facilmente. Dessa forma, depois da secagem foram realizadas uma operação de redução de tamanho e peneiramento com o objetivo de uniformizar o tamanho da partícula de BCA.

Dos trabalhos consultados observou-se que não há uma norma ou recomendação específica que defina uma faixa granulometria ou tamanho de partícula da biomassa para um processo de torrefação. Ensaios preliminares demonstraram que o uso de partículas de BCA de menor faixa granulométrica da como resultado partículas de BCA torrificadas muito quebradiças, as quais durante a sua manipulação geraram uma quantidade significativa de finos. Esta condição dificulta a sua manipulação, além disso, do ponto de vista industrial reduzir o tamanho de partícula implicaria em um consumo de energia o que influenciaria o custo da torrefação.

A Figura 22 exibe o BCA moído e peneirado na granulometria definida. Neste trabalho, utilizou-se partículas secas de BCA em uma faixa de tamanho de partícula entre 500 e 850 μm . Para realizar os ensaios de torrefação, o BCA foi secado em estufa a 105°C por 48h.

Figura 22 - BCA seco e peneirado (500-850 μm)

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.2 Análise composicional e imediata do BCA

A Tabela 2, apresenta os resultados da análise composicional e imediata do BCA. Os resultados mostram um teor de holocelulose (hemicelulose e celulose) de aproximadamente 75%. O valor mostra-se coerente, já que o teor de holocelulose é responsável por grande parte do material volátil no BCA. Os teores de lignina e extrativos estão de acordo com aqueles apresentados na literatura. Algumas diferenças nos valores podem ser devido à forma de cultivo e espécie de cana.

Tabela 2 – Análise composicional e imediata do BCA.

Análise composicional (%)	Neste trabalho	Kanwal et al. (2019)	Análise imediata (%)	Neste trabalho	Manatura (2020)
Extrativos	6,72	12,7	Umidade	4,26	-
Hemiceluloses	33,58	26,3	Material volátil	81,25	83,46
Celulose	41,97	36,9	Carbono fixo	13,26	14,26
Lignina	17,72	19,2	Cinzas	1,23	2,7

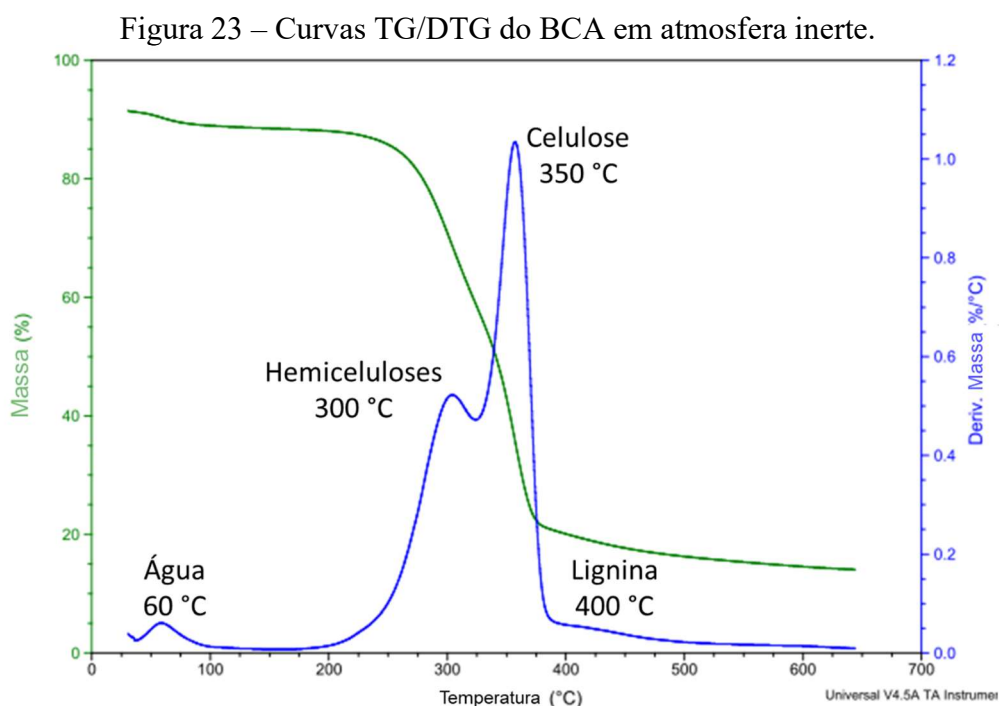
Fonte: Produção do próprio autor.

O BCA exibe um elevado teor de material volátil, o que permite que tenha uma baixa temperatura de ignição e uma elevada reatividade, no entanto, pode gerar problemas técnicos ao realizar a sua queima em uma câmara de combustão. Isto ocorre porque grande parte da massa do BCA será volatilizada, gerando fumaça e pressão dentro de uma câmara de combustão (Miranda *et al.* 2021; Dias *et al.* 2013). O teor de cinzas do BCA é próximo do apresentado por Santos *et al.* (2013) que é de $1,61 \pm 0,02$ %, além disso, se encontra dentro

das faixas recomendadas na literatura, para aplicações em combustão, onde seu valor deve ser inferior a 5% para reduzir a tendência a produzir incrustações dentro da câmara de combustão, como apontado no trabalho de Brito *et al.* (2018).

4.1.3 Análise termogravimétrica

O comportamento térmico do BCA em atmosfera inerte é analisado através de curvas termogravimétricas apresentadas na Figura 23. Analisando a curva DTG (linha azul), podem-se observar três picos associados a eventos específicos de decomposição térmica do BCA. O primeiro evento, abaixo dos 100°C, está associado à vaporização da água contida no BCA. O segundo evento a 310°C, está associado à decomposição térmica da hemicelulose. O terceiro evento, de maior intensidade, a 350°C, está vinculado à decomposição térmica da celulose. A lignina se decompõe de forma gradual iniciando desde aproximadamente 180°C, atingindo um valor máximo ao redor de 400°C. Observou-se que os perfis de decomposição térmica do BCA são similares a outros tipos de biomassa lignocelulósica, isto devido à semelhança entre seus componentes básicos (hemiceluloses, celulose e lignina). Um exemplo disso se observa no trabalho de Santos *et al.* (2013), onde se avaliaram amostras de eucalipto que apresentaram os mesmos picos de eventos térmicos e a lignina manteve a ausência de um pico, isto devido a que sua decomposição ocorre numa ampla faixa de temperatura.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com os valores da temperatura de decomposição térmica em atmosfera inerte dos componentes do BCA, pode-se ter uma noção de como a temperatura de torrefação afetará a composição do BCA. Assim, considerando a maior temperatura de torrefação (300°C), entende-se que as hemiceluloses sofrerão um processo de despolimerização com emissão de voláteis e gases, entretanto a lignina sofre um processo de transição vítrea como apontado por Santos *et al.* (2013).

4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO BCA TORRIFICADO

A Figura 24 exibe as amostras de BCA torreficado em diferentes temperaturas e em atmosfera inerte e oxidativa. Observa-se um escurecimento gradual na cor das amostras conforme aumenta a temperatura de torrefação. Variando de uma tonalidade de cor marrom (200°C) tornando-se a uma cor negro (300°C).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se entender que a mudança de cor é um sinal qualitativo de alterações na composição química do BCA, por exemplo pode-se deduzir que a concentração de carbono está aumentando. Durante os ensaios foi possível identificar um cheiro mais forte no BCA

torrificado em temperaturas acima dos 280°C. Isto pode ser explicado pela à maior liberação de material volátil com o aumento da temperatura de torrefação. Foi percebido que a rigidez do BCA diminui significativamente com o aumento da temperatura, isto pode ser verificado pela maior formação de finos (partículas muito finas) o que indica que a estrutura física da biomassa foi modificada. Também, observa-se que a maior temperatura e concentração de oxigênio, o BCA torna-se mais escuro, dificultando encontrar alguma variação de forma qualitativa. Entretanto, devido a oxidação parcial do BCA gerasse uma camada superficial de cinzas o que faz que a cor fique mais clara quando comparada com o BCA torrificado em atmosfera inerte.

4.2.1 Análise imediata e poder calorífico

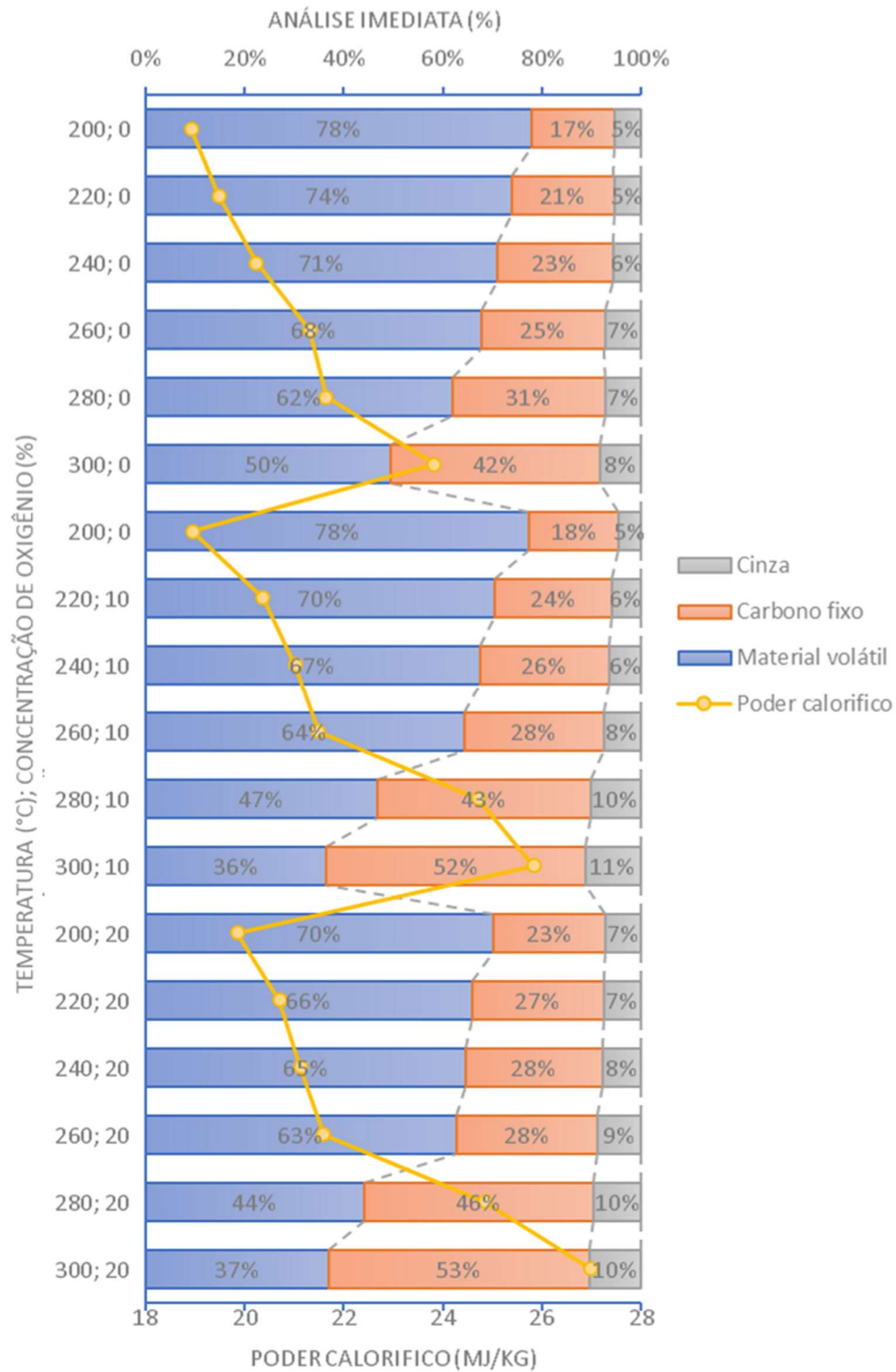
A Figura 25 apresenta a análise imediata do BCA torrificado em diferentes condições. Analisando os resultados é possível verificar que a redução do teor de material volátil do BCA torrificado em comparação com o BCA in natura.

Existe uma relação inversamente proporcional entre a temperatura de torrefação e o teor material volátil (MV). Independentemente da concentração de oxigênio no gás de arrasto, se a temperatura aumenta, a tendência do MV é a diminuir. Isto está associado com a decomposição dos compostos do BCA, já que, com o aumento da temperatura promove uma maior decomposição das hemiceluloses e celulose e uma mínima fração da lignina, no entanto grande parte desta última fica retida aumentando o teor de carbono fixo (CF).

Então, observa-se que os componentes mantêm comportamentos estáveis em relação ao aumento da temperatura. Por exemplo, no caso do material volátil decresce quanto mais alta a temperatura, e no caso do carbono fixo aumenta, comportamento relacionado, já que a redução do teor de material volátil diminui a massa total, e em consequência aumentam os teores de carbono fixo e de cinzas contidos na estrutura do BCA torrificado

No caso do teor de cinzas, houve um aumento proporcional com a temperatura do processo, porém, com o aumento do teor de oxigênio o teor de cinzas aumentou ainda mais, isto devido ao aumento da temperatura interna causada pela oxidação parcial do material, gerando uma decomposição acima da temperatura de processo, comportamento observado nos trabalhos de Cheng *et al.* (2022) e Riaz *et al.* (2022).

Figura 25 - Análise imediata e poder calorífico do BCA torreficado



Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 25 apresenta o PCS obtido na análise calorimétrica do BCA torreficado, mostrando que teve um aumento de até 47,61% para a amostra de 300 °C, quando comparado com o PCS do BCA in natura. O poder calorífico mostra sua correlação com o carbono fixo

conforme o apontado por Demirbas (2022), sendo a temperatura de 300 °C onde se tem os PCSs maiores de cada condição de torrefação.

Com os resultados obtidos, infere-se uma influência direta do teor de carbono fixo no poder calorífico como foi observado no trabalho de Özyuguran *et al.* (2016). Isto pelo fato que influencia diretamente no potencial energético da biomassa, no entanto. O decréscimo no teor de material volátil diminui a dificuldade do processo de utilização do BCA como apontado por Verdugo *et al.* (2022).

Com isto melhoraram-se as propriedades combustíveis da matéria prima, fazendo sua queima mais eficiente, sem ter interferência do vapor de água gerado. Isto porque a hemicelulose é o primeiro componente a iniciar sua decomposição, já que o aumento da temperatura provoca quebra nas ligações de baixa energia, resultando na remoção dos grupos de C-H e C-O (Santos, 2022). No caso da lignina, se reforçam os grupos C-C que se encontram maioritariamente nela, gerando um aumento no teor de carbono fixo, o qual está ligado a um melhor poder calorífico.

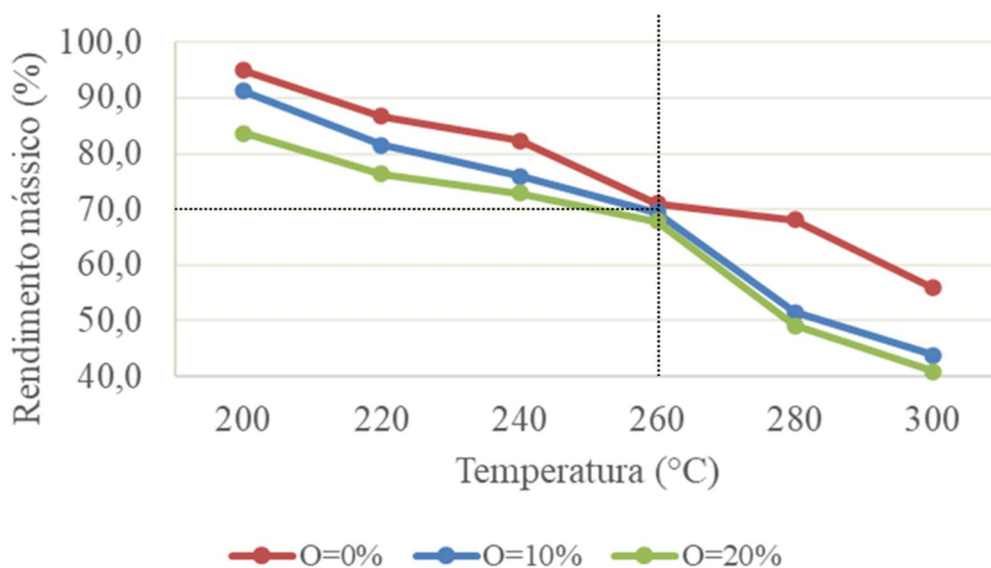
4.3 PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DA TORREFAÇÃO

Os parâmetros de avaliação da torrefação se utilizam para ter uma melhor compreensão do comportamento mássico e energético da biomassa após a sua torrefação. A temperatura e a concentração de oxigênio terão um significativo efeito no compor comportamento dos parâmetros de avaliação.

A Figura 26 exhibe o comportamento do RM da torrefação de BCA em função da temperatura em atmosfera oxidativa e não oxidativa. Em ambas as atmosferas de torrefação, o RM apresenta uma tendência decrescente com o aumento da temperatura, isto é, devido à decomposição térmica mais intensa dos componentes da biomassa, provocando uma maior geração de material volátil, gerando assim uma perda de massa. Para que o processo de torrefação seja sustentável, é recomendado que o RM tenha um valor mínimo de 70% (Korshunov *et al.* 2020).

Na torrefação oxidativa do BCA, se observa que o aumento da concentração de oxigênio da como resultado um RM inferior quanto comparado com o RM da torrefação não oxidativa. Na torrefação oxidativa há uma redução adicional, isto devido à oxidação parcial das partículas BCA provocada pelo oxigênio presente, sendo mais notável quando se usou diretamente ar (maior concentração de oxigênio). Este comportamento também foi observado no trabalho de Zhang *et al.* (2019), o qual estudaram a torrefação oxidativa de casca de noz.

Figura 26 - RM da torrefação do BCA.



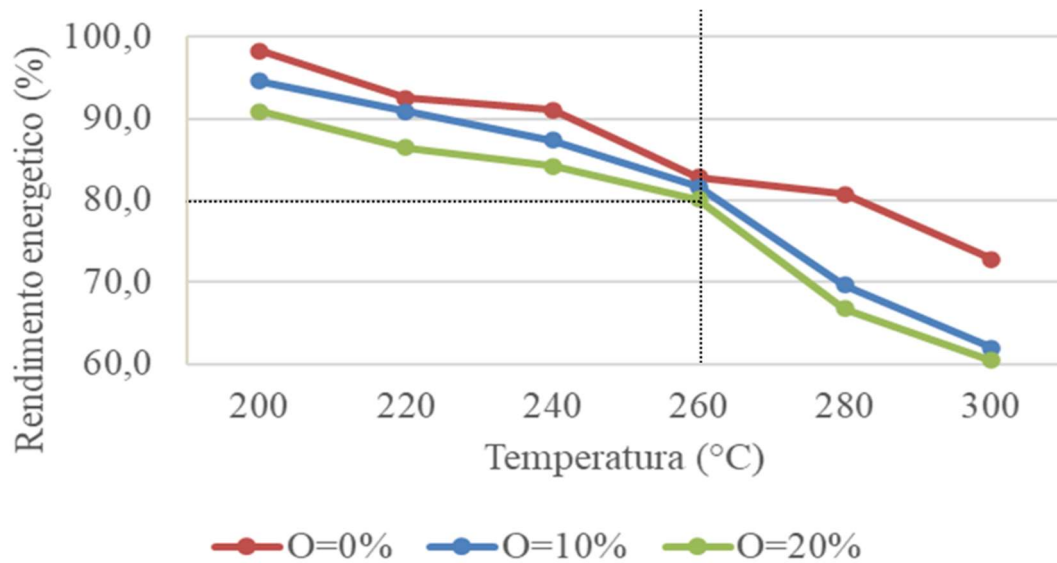
Fonte: Elaborado pelo autor

Em temperaturas acima de 260°C há uma redução do RM de forma mais acentuada pela oxidação parcial mais intensa que sofrem as partículas de BCA. Independentemente da concentração de oxigênio, ambas torrefações oxidativas apresentam o mesmo perfil. Como apontado por Basu (2018), depois de 270°C, o processo de torrefação muda o comportamento de endotérmico a exotérmico, promovendo o ganho de calor e a decomposição do próprio material, numa condição oxidativa a presença do oxigênio promoveria ainda mais essa decomposição. Finalmente, a 300°C ambas as torrefações oxidativas atingem um valor de RM entre 40 e 45%, valores que estão abaixo do RM obtido em atmosfera não inerte (56%). Este resultado corrobora a decomposição térmica adicional que experimenta a biomassa durante a sua torrefação oxidativa. Os valores de RM obtidos neste trabalho ficaram um pouco acima aos valores reportados (31% e 30%) por Zhang *et al.* (2019) e Cheng *et al.* (2022) considerando uma torrefação a 300°C e 30 minutos. A diferença entre os valores obtidos neste trabalho e os trabalhos citados pode ser devido à vazão de gás de arrasto (ar sintético – 21% de O₂) utilizada sendo 300 ml/min e 500 ml/min respectivamente. Uma maior vazão de gás de arrasto exibira uma maior disponibilidade de moléculas de O₂, as quais podem tornar muito mais reativa a torrefação oxidativa. Também, outros parâmetros da torrefação podem influenciar no valor do RM, tais como um maior tempo de torrefação ou uma menor granulometria da biomassa.

Na Figura 27, se mostra o comportamento do RE da torrefação de BCA em função da temperatura em atmosfera oxidativa e não oxidativa. O RE em ambas as atmosferas de torrefação exhibe uma redução progressiva em função da temperatura, isto é, devido à sua

associação com a perda de massa mostrada no RM. Na determinação do RE, são necessários os valores de RM e FM, ambos apresentam um comportamento inverso em função da temperatura. No processo de torrefação é recomendado que o RE tenha um valor mínimo de 80% (Gent *et al.* 2017), dessa forma, a temperatura de torrefação do BCA nas diferentes atmosferas estaria ao redor de 280°C.

Figura 27 - RE da torrefação do BCA.



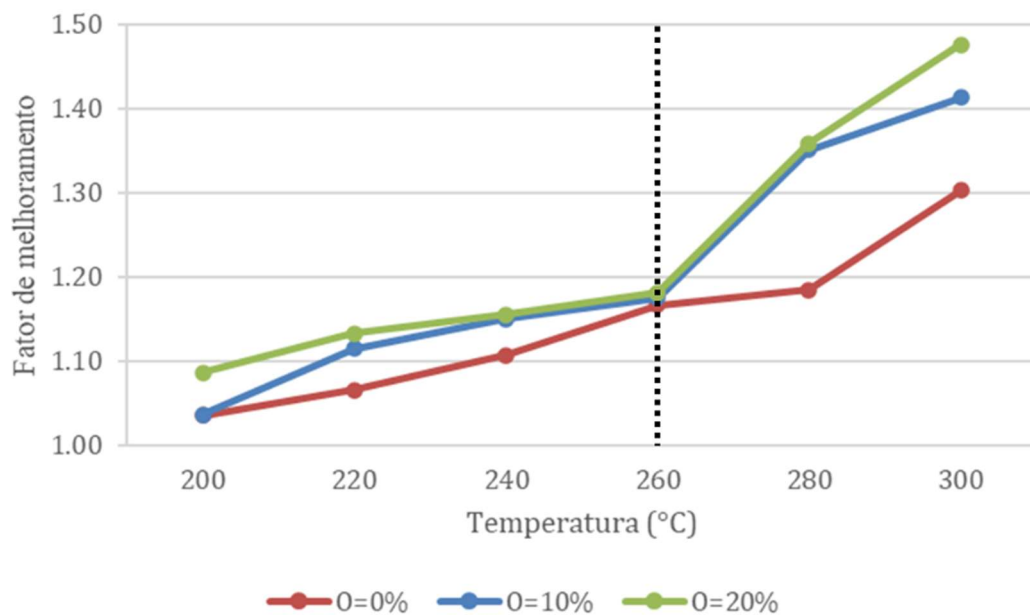
Fonte: Elaborado pelo autor.

O comportamento do RE em ambas as atmosferas de torrefação (oxidativa e não oxidativa), apresentam uma tendencia decrescente com o aumento da temperatura. O maior RE foi obtido em 200 °C e o menor em 300 °C para todas as atmosferas de torrefação, no entanto. Considerando uma temperatura de torrefação, o valor do RE será menor quanto maior é a concentração de oxigênio. Essa mesma tendencia encontrasse no trabalho de Chen *et al.* (2020). Também, depois de 260°C o RE exibe uma redução considerável, sendo mais evidente na condição oxidativa. No trabalho de Cheng *et al.* (2022) a torrefação oxidativa da casca de arroz apresentou um comportamento semelhante, e isto se relaciona com a mudança de comportamento da reação de torrefação relatada por Basu (2018).

Finalmente, a 300°C a torrefação oxidativa do BCA atingem um valor de RE entre 60 e 62%, valores que estão abaixo do RE obtido em atmosfera inerte (73%). Este resultado confirma que a diminuição do RM afeta significativamente o comportamento do RE. Os trabalhos de Zhang *et al.* (2019) e Cheng *et al.* (2022) obtiveram valores baixos de RE a 300°C sendo 42 % e 28 % respectivamente. Como discutido anteriormente a principal diferença pode-se dever às diferentes vazões de gás de arrasto utilizadas.

Na Figura 28 se apresenta o comportamento do FM em função da temperatura em ambas as atmosferas, oxidativa e não oxidativa. O FM tem um comportamento crescente em função da temperatura, isto está associado diretamente com a decomposição térmica da biomassa, a qual reduz o teor de água e material volátil, aumentando o teor de carbono fixo. Essa mudança na biomassa provoca um aumento da concentração de carbono e uma redução de oxigênio fazendo que o poder calorífico aumente.

Figura 28 - FM da torrefação do BCA



Fonte: Elaborado pelo autor.

Entre 200 e 260 °C, o FM apresenta um aumento gradual, onde a torrefação oxidativa apresenta um valor de FM ligeiramente superior ao obtido na torrefação inerte. A 260°C, o FM da torrefação em todas as atmosferas estudadas apresenta um valor semelhante, no entanto, acima desta temperatura a torrefação oxidativa apresenta um significativo aumento. Essa tendência é observada nos trabalhos de Zhang *et al.* (2023) e Riaz *et al.* (2022) da torrefação oxidativa da palha de milho e pellets de madeira.

O comportamento em ambas as atmosferas de torrefação é crescente, no entanto, na condição oxidativa o aumento do FM após 260°C é visivelmente mais acentuado que na condição não oxidativa. Já que depois de 260°C, inicia a decomposição exotérmica da biomassa como apontado por Basu (2018). O calor é liberado e a decomposição continua espontaneamente, sendo marcada com grande diferença nas condições oxidativas, devido ao aumento de temperatura gerado internamente.

O maior valor de FM foi obtido a 300°C nas atmosferas oxidativas foi entre 1,40 (10% de O₂) e 1,50 (20% de O₂), ambos os valores estão acima do FM obtido em atmosfera não oxidativa (1,3). Este resultado corrobora que a melhora nas características combustíveis do BCA pode ser realizada em uma torrefação oxidativa em temperaturas inferiores quando comparada com não oxidativa. A torrefação oxidativa de outras biomassas como casca de noz e palha de milho estudadas nos trabalhos de Zhang *et al.* (2019) e Zhang *et al.* (2023) respectivamente, obtiveram valores de FM semelhantes, sendo 1,31 e 1,47, considerando uma torrefação a 300°C. Não há uma diferença significativa entre os valores obtidos e os apresentados pela literatura, considerando as mesmas condições de torrefação (300°C, 30 min, 20% de O₂). A pequena diferença entre os valores pode-se ser devido às propriedades físicas e químicas específicas de cada biomassa.

No caso da torrefação de BCA, pode-se especular que a temperatura de torrefação mais adequada se encontra entre 240 e 280 °C em uma condição inerte, e entre 240 e 260 °C para condições oxidativas, além disso, considera-se que a condição oxidativa tem melhor desempenho, já que se obtêm os resultados esperados em temperatura inferiores quando comparado com inerte.

4.4 COMPORTAMENTO TÉRMICO DA TORREFAÇÃO

Umas das características da torrefação oxidativa é a sua capacidade de gerar uma quantidade de calor, devido à oxidação parcial por parte das partículas. O calor gerado deve provocar algum incremento de temperatura, mesmo se a torrefação está programada para uma temperatura específica. O reator usado neste estudo possui 1 termopar na parte interior, o qual é usado para controlar a temperatura de torrefação e servirá para verificar se há alguma variação de temperatura.

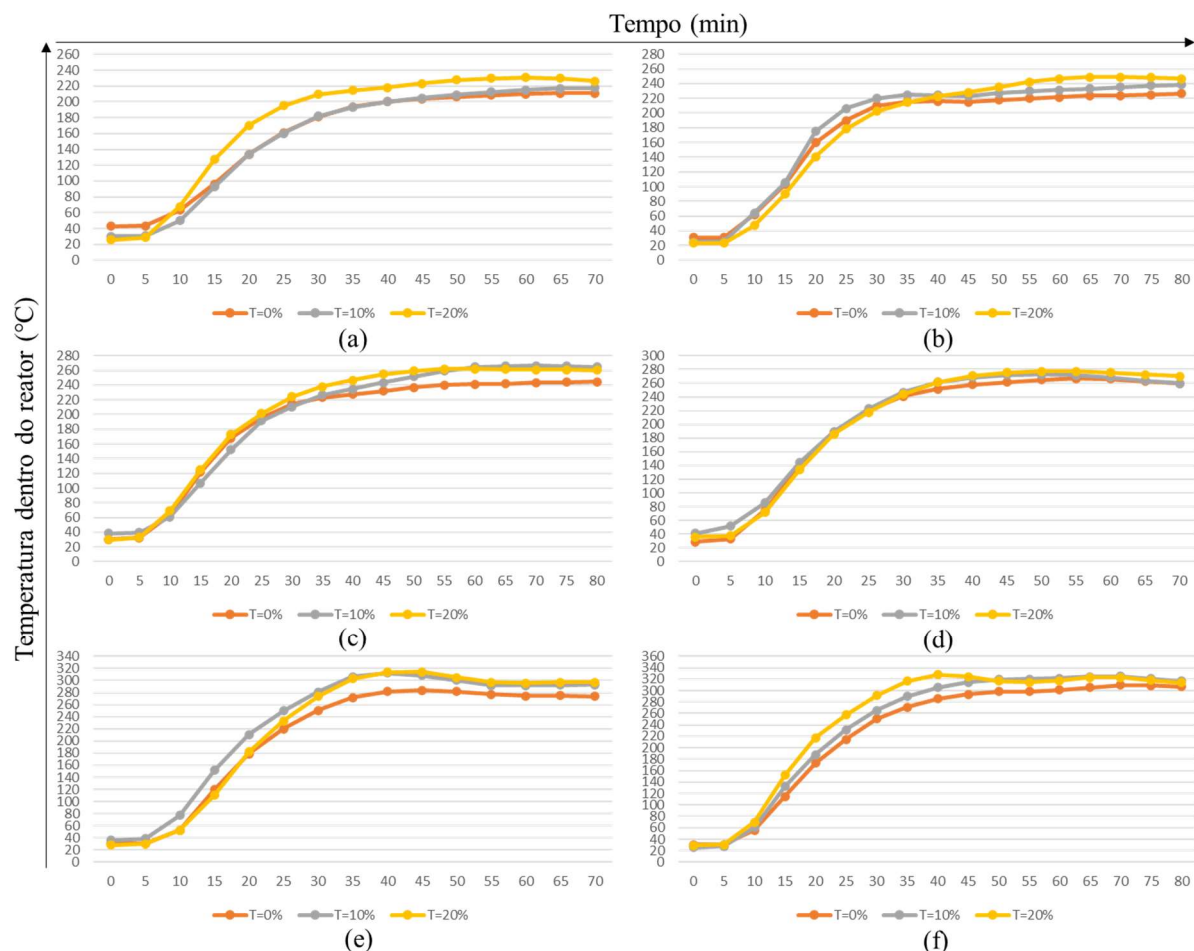
A Figura 29 apresenta o comportamento da temperatura interna do reator em função do tempo nas diferentes temperaturas e atmosferas de torrefação estudadas. A torrefação não oxidativa do BCA tem um perfil de temperaturas mais estável em qualquer temperatura de torrefação especificada. Pode-se observar que uma vez atingida a temperatura de torrefação e mantendo a isoterma por 30 minutos, a temperatura interna do reator permanece com mínimas variações.

No entanto, na torrefação oxidativa a temperatura interna do reator apresentou valores diferentes, exibindo alguns graus de diferença quando comparado com o perfil de temperaturas obtido na torrefação não oxidativa. Este incremento de alguns graus de

temperatura seria um indicativo do calor gerado internamente devido à oxidação parcial das partículas de BCA durante a sua torrefação. Esta condição provocou uma dificuldade no controle do aquecimento elétrico devido ao calor adicional gerado, sendo mais evidente na torrefação oxidativa usando uma corrente de ar sintético ao 20% de O_2 .

O incremento da temperatura no reator de torrefação também foi observado no trabalho de Leontiev *et al.* (2019b), onde se calcula um sobreaquecimento no processo, o qual é proporcional à quantidade de O_2 que ingressava no reator. Nota-se que mesmo tendo comportamentos diferentes em função da temperatura, se mantém estável que as condições oxidativas superam a temperatura de torrefação inerte, as vezes mantendo uma separação entre as 3 condições, como no caso da torrefação a 220 °C (Fig. 29b), outras juntando-se as condições oxidativas a 240 °C (Fig. 29c), ou demais comportamentos apresentados. O que valida a ideia de geração de calor interna pela oxidação parcial da biomassa ao reagir com o O_2 .

Figura 29 - Comportamento térmico do processo de torrefação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5 CONCLUSÕES

O BCA conta com propriedades físico-químicas adequadas para sua utilização como combustível (razoável PCS e um baixo teor de cinzas), no entanto, também apresenta propriedades que limitam a eficiência do seu aproveitamento energético (elevado teor de umidade, higroscopicidade e baixa densidade energética).

Os resultados obtidos neste trabalho demonstram que torrefação oxidativa pode ser usada como um processo de pré-tratamento alternativo para melhorar as propriedades físicas e químicas do BCA.

A torrefação oxidativa em temperaturas inferiores a 260 °C apresentou um comportamento favorável para as propriedades energéticas do BCA, o que demonstra que é possível sua implementação e funcionamento mesmo oxidando parte do material, já que o ganho energético e diminuição do consumo de calor compensa a perda de material.

Os parâmetros de avaliação da torrefação demonstraram que o RM e RE na torrefação oxidativa são menores, no entanto o FM é melhor na torrefação oxidativa quando comparada com a inerte.

O incremento da temperatura interna no reator verificado durante a torrefação oxidativa do BCA, é um indicativo da possibilidade de redução da temperatura do processamento.

O melhoramento das propriedades do BCA na torrefação oxidativa pode ser obtido em uma inferior faixa de temperaturas (220 e 240 °C) quando comparado com a torrefação não oxidativa (240 e 260 °C). Isto poderia trazer uma redução do custo do processamento.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar o comportamento da torrefação de BCA com dióxido de carbono e gases de exaustão.
- Fazer uma análise econômica da torrefação oxidativa e inerte para comparar o consumo e produção energética de ambas.
- Realizar um estudo de otimização da torrefação oxidativa do BCA.

REFERÊNCIAS

- ALIYU, A.; LEE, J. G. M.; HARVEY, A. P. Microalgae for biofuels: A review of thermochemical conversion processes and associated opportunities and challenges. **Bioresource Technology Reports**, Newcastle, v. 15, p. 100694. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2589014X21000712>. Acesso em: 10 jan. 2022.
- ALMEIDA, S. G. *et al.* Biochar production from sugarcane biomass using slow pyrolysis: Characterization of the solid fraction. **Chemical Engineering and Processing-Process Intensification**, Araraquara, v. 179, p. 109054. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S025527012200264>. Acesso em: 10 dez. 2022.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3172**: Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke. West Conshohocken, PA: ASTM, 2021.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3175-20**: Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke. West Conshohocken, PA: ASTM, 2020.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1102-84**: Standard Test Method for Ash in Wood. West Conshohocken, PA: ASTM, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14660**: Madeira - Amostragem e preparação para análise. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14929**: Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- BAJPAL, P. **Lignocellulosic Biomass in Biotechnology**. Cambridge: Elsevier, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128218891/lignocellulosic-biomass-in-biotechnology>. Acesso em: 20 jan. 2022.
- BASU, P. **Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory**. 3. ed. Cambridge: Academic press, 2018.
- BLASI, C. Modeling and simulation of combustion processes of charring and noncharring solid fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, Nápoles, v. 19, p. 71 104, 1993. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0360128593900227>. Acesso em: 20 jun. 2021.
- BONASSA, G, *et al.* Scenarios and prospects of solid biofuel use in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Cascavel, v. 82, p. 2365-2378. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117312200>. Acesso em: 20 jun. 2021.

BRACHI, P. *et al.* Fluidized bed torrefaction of biomass pellets: A comparison between oxidative and inert atmosphere. **Powder Technology**, Nápoles, v. 357, p. 97-107. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032591019306576>. Acesso em: 20 jun. 2021.

BRITO, J.; AGRELA, F. **New trends in eco-efficient and recycled concrete**. Sawston: Woodhead Publishing, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/book/9780081024805/new-trends-in-eco-efficient-and-recycled-concrete>. Acesso em: 20 jun. 2021.

CAO, X. *et al.* Effects of oxidative torrefaction on the physicochemical properties and pyrolysis products of hemicellulose in bamboo processing residues. **Industrial Crops and Products**, Hangzhou, v. 191, p. 115986. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926669022014698>. Acesso em: 20 abr. 2023.

CHEN, D. *et al.* Upgrading rice husk via oxidative torrefaction: Characterization of solid, liquid, gaseous products and a comparison with non-oxidative torrefaction. **Fuel**, Nanjing, v. 275, p. 117936. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236120309327>. Acesso em: 20 abr. 2023.

CHEN, W. *et al.* Progress in biomass torrefaction: Principles, applications and challenges. **Progress in Energy and Combustion Science**, Tainan, v. 82, p. 100887. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128520300976>. Acesso em: 20 abr. 2022.

CHENG, W. *et al.* Effect of oxidative torrefaction on particulate matter emission from agricultural biomass pellet combustion in comparison with non-oxidative torrefaction. **Renewable Energy**, Wuhan, v. 189, p. 39-51. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221334371730533X>. Acesso em: 20 abr. 2023.

CONAG, A. *et al.* Energy densification of sugarcane bagasse through torrefaction under minimized oxidative atmosphere. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, Talamban, v. 5, no 6, p. 5411-5419. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148122003093>. Acesso em: 20 abr. 2023.

CONAG, A. *et al.* Energy densification of sugarcane leaves through torrefaction under minimized oxidative atmosphere. **Energy for Sustainable Development**, Talamban, v. 42, p. 160-169. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0973082617307949>. Acesso em: 20 abr. 2023.

DAI, L. *et al.* Integrated process of lignocellulosic biomass torrefaction and pyrolysis for upgrading bio-oil production: A state-of-the-art review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Nanchang, v. 107, p. 20-36. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403211930108X>. Acesso em: 20 abr. 2023.

DEMIRBAS, A. Relationships between heating value and lignin, moisture, ash and extractive contents of biomass fuels. **Energy exploration & exploitation**, Trebizonda, v. 20, n. 1, p. 105-111, 2002. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1260/014459802760170420>. Acesso em: 20 jul. 2021.

DIAS, M. *et al.* Biorefineries for the production of first and second generation ethanol and electricity from sugarcane. **Applied Energy**, Campinas, v. 109, p. 72-78. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261913002778>. Acesso em: 20 abr. 2023.

DOVICH FILHO, F. B. *et al.* An approach to technology selection in bioelectricity technical potential assessment: A Brazilian case study. **Energy**, Itajubá, v. 272, p. 126995. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544223003894>. Acesso em: 20 abr. 2023.

ELGARAHY, A. M. *et al.* Thermochemical conversion strategies of biomass to biofuels, techno-economic and bibliometric analysis: A conceptual review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, Porto Saíde, v. 9, n. 6, p. 106503. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213343721014809>. Acesso em: 20 abr. 2023.

EPE BRASIL. **Energia**. ABC da energia, [2022]. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 26 abr. 2023.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATIONS (FAO). **Statistics**. Crops, [2020]. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>. Acesso em: 26 abr. 2023.

GENT, S. *et al.* **Theoretical and applied aspects of biomass torrefaction**: for biofuels and value-added products. Oxônia: Butterworth-Heinemann, 2017.

GRANADOS, D. A. *et al.* Study of reactivity reduction in sugarcane bagasse as consequence of a torrefaction process. **Energy**, Medellín, v. 139, p. 818-827. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544217313889>. Acesso em: 20 jul. 2021.

HE, Z. *et al.* Valorizing renewable cellulose from lignocellulosic biomass toward functional products. **Journal of Cleaner Production**, Tianjin, v. 414, p. 137708, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652623018668>. Acesso em: 20 jul. 2023.

HOSSEINI, M. **Advanced bioprocessing for alternative fuels, biobased chemicals, and bioproducts**. Sawston: Woodhead Publishing, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128179413/advanced-bioprocessing-for-alternative-fuels-biobased-chemicals-and-bioproduts>. Acesso em: 10 jul. 2021.

IEA. **World Energy Outlook 2022**. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>. Acesso em: 26 abr. 2023.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). **IPCC Good Practice Guidance for LULUCF**. [2003.]. Disponível em: <https://www.ipcc-iges.or.jp/public/gpglulucf/gpglulucf.html>. Acesso em: 26 ago. 2022.

ISLAMOVA, S. I. *et al.* Oxidative torrefaction of sunflower husk pellets in the kaolin layer. **BioEnergy Research**, Cazã, v. 15, p. 183–192. 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12155-021-10280-6>. Acesso em: 20 ago. 2022.

JOSHI, Y. *et al.* Packed-bed torrefaction of bagasse under inert and oxygenated atmospheres. **Energy & fuels**, Delft, v. 29, n. 8, p. 5078–5087. 2015. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.energyfuels.5b00779>. Acesso em: 20 ago. 2021.

KANWAL, S. *et al.* Effect of torrefaction conditions on the physicochemical characterization of agricultural waste (sugarcane bagasse). **Waste Management**, Lahore, v. 88, p. 280–290. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X19301849>. Acesso em: 20 ago. 2021.

KHALIL, M. J. *et al.* Utilization of sugarcane bagasse ash as cement replacement for the production of sustainable concrete—A review. **Construction and Building Materials**, Multã, v. 270, p. 121371. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061820333754>. Acesso em: 20 ago. 2022.

KORSHUNOV, A. *et al.* Torrefaction of wood in a quiescent layer of talc. **Energy & Fuels**, Moscou, v. 34, n. 4, p. 4660–4669. 2020. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.energyfuels.9b04478>. Acesso em: 20 ago. 2021.

KOTA, K. B. *et al.* Biomass torrefaction: An overview of process and technology assessment based on global readiness level. **Fuel**, Deradum, v. 324, p. 124663. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236122015113>. Acesso em: 20 ago. 2023.

LACA, A.; LACA, A.; DÍAZ, M. **Hydrolysis**: From cellulose and hemicellulose to simple sugars. In: Basile, A (Coord.). **Second and Third Generation of Feedstocks**. Amesterdã: Elsevier, 2019. Cap. 8, p. 213–240. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128151624000082>. Acesso em: 20 ago. 2023.

LEE, J. *et al.* Bioenergy generation from thermochemical conversion of lignocellulosic biomass-based integrated renewable energy systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Suwon, v. 178, p. 113240. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032123000965>. Acesso em: 20 ago. 2023.

LEONTIEV, A. *et al.* The effect of an inhibitor on the torrefaction of pellets inside a quiescent layer of bentonite clay. **Biomass and Bioenergy**, Moscou, v. 130, p. 105381. 2019a. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953419303307>. Acesso em: 20 dez. 2021.

LEONTIEV, A. *et al.* Torrefaction of biomass in a quiescent mineral layer: Influence of mineral filler type. **Fuel**, Moscou, v. 255, p. 115740. 2019b. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236119310920>. Acesso em: 20 dez. 2021.

LI, X. *et al.* Effect of oxidative torrefaction on high temperature combustion process of wood sphere. **Fuel**, Guangzhou, v. 286, p. 119379. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236120323759>. Acesso em: 20 dez. 2022.

LIANG, J. *et al.* Promising biological conversion of lignocellulosic biomass to renewable energy with rumen microorganisms: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Beijing, v. 134, p. 110335. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032120306237>. Acesso em: 20 set. 2021.

LIMA, D. R. S. *et al.* Influence of different thermal pretreatments and inoculum selection on the biomethanation of sugarcane bagasse by solid-state anaerobic digestion: a kinetic analysis. **Industrial Crops and Products**, Ouro Preto, v. 111, p. 684-693. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926669017308075>. Acesso em: 20 set. 2021.

LIU, Y. *et al.* Torrefaction of corn straw in oxygen and carbon dioxide containing gases: Mass/energy yields and evolution of gaseous species. **Fuel**, Jinan, v. 285, p. 119044. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236120320408>. Acesso em: 20 set. 2022.

LIU, Z. *et al.* Hydrochar and pyrochar for sorption of pollutants in wastewater and exhaust gas: A critical review. **Environmental Pollution**, Beijing, v. 268, p. 115910. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749120365994>. Acesso em: 20 set. 2022.

LU, H. *et al.* Integration of biomass torrefaction and gasification based on biomass classification: a review. **Energy Technology**, Shanghai, v. 9, n. 5, p. 2001108. 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ente.202001108>. Acesso em: 20 set. 2022.

MANATURA, K. Inert torrefaction of sugarcane bagasse to improve its fuel properties. **Case Studies in Thermal Engineering**, Kamphaeng Saen, v. 19, p. 100623. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X19305118>. Acesso em: 20 set. 2022.

Ministério de minas e energia (MME). **Relatório BEN 2012**. Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2012.pdf. Acesso em: 05 abr. 2022.

MIRANDA, N. T. *et al.* Sugarcane bagasse pyrolysis: A review of operating conditions and products properties. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Campinas, v. 149, p. 111394. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032121006791>. Acesso em: 20 set. 2022.

NGUYEN, L. N. *et al.* Application of rumen and anaerobic sludge microbes for bio harvesting from lignocellulosic biomass. **Chemosphere**, Sydney, v. 228, p. 702-708. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653519308136>. Acesso em: 20 set. 2022.

NWABUNWANNE, N. *et al.* Improving the solid fuel properties of non-lignocellulose and lignocellulose materials through torrefaction. **Materials**, Alice, v. 14, n. 8, p. 2072. 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/14/8/2072>. Acesso em: 20 set. 2022.

OLUGBADE, T. O.; OJO, O. T. Biomass torrefaction for the production of high-grade solid biofuels: a review. **BioEnergy Research**, Hong Kong, v. 13, n. 4, p. 999-1015. 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12155-020-10138-3>. Acesso em: 20 set. 2021.

ONG, H. C. *et al.* Catalytic thermochemical conversion of biomass for biofuel production: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Kuala Lumpur, v. 113, p. 109266. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032119304745>. Acesso em: 20 set. 2022.

ONG, H. C. *et al.* A state-of-the-art review on thermochemical conversion of biomass for biofuel production: A TG-FTIR approach. **Energy Conversion and Management**, Kuala Lumpur, v. 209, p. 112634. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890420301722>. Acesso em: 20 set. 2022.

ONG, H. C. *et al.* Variation of lignocellulosic biomass structure from torrefaction: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Kuala Lumpur, v. 152, p. 111698. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121009722>. Acesso em: 20 set. 2022.

PANG, S. Advances in thermochemical conversion of woody biomass to energy, fuels and chemicals. **Biotechnology advances**, Christchurch, v. 37, n. 4, p. 589-597. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0734975018301800>. Acesso em: 20 set. 2021.

PEDROSO, D. T. *et al.* Technical assessment of the Biomass Integrated Gasification/Gas Turbine Combined Cycle (BIG/GTCC) incorporation in the sugarcane industry. **Renewable Energy**, Guaratinguetá, v. 114, p. 464-479. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148117306511>. Acesso em: 20 set. 2022.

RAMOS, A.; MONTEIRO, E.; ROUBOA, A. Biomass pre-treatment techniques for the production of biofuels using thermal conversion methods—A review. **Energy Conversion and Management**, Porto, v. 270, p. 116271. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890422010482>. Acesso em: 20 set. 2022.

RIAZ, S.; OLUWOYE, I.; AL-ABDELI, Y. M. Oxidative torrefaction of densified woody biomass: Performance, combustion kinetics and thermodynamics. **Renewable Energy**, Joondalup, v. 199, p. 908-918. 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148122013660>. Acesso em: 20 abr. 2023.

RIAZ, S.; AL-ABDELI, Y. M.; OLUWOYE, I. Partially Oxidative Torrefaction of Woody Biomass Pellets: Burning Behaviour and Emission Analysis. **BioEnergy Research**, Joondalup, p. 1-11. 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12155-023-10572-z>. Acesso em: 20 abr. 2023.

ROUSSET, P. *et al.* Biomass torrefaction under different oxygen concentrations and its effect on the composition of the solid by-product. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Brasília, v. 96, p. 86-91. 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016523701200071X>. Acesso em: 20 abr. 2022.

ROWELL, R. Cell Wall Chemistry. *In*: ROWELL, R. **Handbook of wood chemistry and wood composites**. Boca Raton: CRC press, 2005. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/mono/10.1201/9780203492437-7/cell-wall-chemistry-roger-rowell-roger-rowell?context=ubx&refId=1c9228bc-e328-4fd7-9b81-3f9cd1306263>. Acesso em: 26 set. 2021.

SANTOS, A. **Torrefação de cavacos de eucalyptus spp usando dióxido de carbono como gás de arraste**. 2022. TCC (Graduação em Engenharia de produção), Universidade Estadual Paulista – Instituto de ciências e engenharia campus Itapeva, Itapeva, 2022. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/116160>. Acesso em: 05 abr. 2023

SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. **BIOENERGIA & BIORREFINARIA: Cana-de-açúcar & Espécies florestais**. Viçosa: Produção independente, 2013.

SHEHZAD, M. *et al.* Impacts of non-oxidative torrefaction conditions on the fuel properties of indigenous biomass (bagasse). **Waste Management & Research**, Paquistão, v. 38, n. 11, p. 1284-1294. 2020. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242X20916843>. Acesso em: 05 abr. 2022.

SORIA-VERDUGO, A. *et al.* Kinetics mechanism of inert and oxidative torrefaction of biomass. **Energy Conversion and Management**, Madrid, v. 267, p. 115892. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890422006884>. Acesso em: 05 abr. 2023.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. **TAPPI T 211 om-16: Ash in Wood, Pulp, Paper and Paperboard: Combustion at 525 Degrees C**. Atlanta: TAPPI, 2016.

THENGANE, S. K. *et al.* Advances in biomass torrefaction: Parameters, models, reactors, applications, deployment, and market. **Progress in Energy and Combustion Science**, Roorkee, v. 93, p. 101040. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360128522000478>. Acesso em: 05 abr. 2023.

UEMURA, Y. *et al.* Torrefaction of empty fruit bunches under biomass combustion gas atmosphere. **Bioresource technology**, Seri Iskandar, v. 243, p. 107-117. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852417309586>. Acesso em: 05 abr. 2023.

UEMURA, Y. *et al.* Torrefaction of oil palm EFB in the presence of oxygen. **Fuel**, Seri Iskandar, v. 103, p. 156-160. 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236111007125>. Acesso em: 05 abr. 2023.

VARMA, A. K.; MONDAL, P. Pyrolysis of sugarcane bagasse in semi batch reactor: Effects of process parameters on product yields and characterization of products. **Industrial Crops and Products**, Roorkee, v. 95, p. 704-717. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926669016308020>. Acesso em: 05 abr. 2023.

WANG, J. *et al.* Emission characteristics and influencing mechanisms of PAHs and EC from the combustion of three components (cellulose, hemicellulose, lignin) of biomasses. **Science of The Total Environment**, Shanghai, v. 859, p. 160359. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969722074617>. Acesso em: 05 abr. 2023.

WAGLE, A. *et al.* Multi-stage pre-treatment of lignocellulosic biomass for multi-product biorefinery: A review. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, Busan, v. 49, p. 101702, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213138821007165>. Acesso em: 05 abr. 2023.

XIANG, H. *et al.* Investigation of the cofiring process of raw or torrefied bamboo and masson pine by using a cone calorimeter. **ACS omega**, Beijing, v. 4, n. 21, p. 19246-19254. 2019. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.9b02593>. Acesso em: 05 abr. 2023.

YEK, P. N. Y. *et al.* Progress in the torrefaction technology for upgrading oil palm wastes to energy-dense biochar: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Zhengzhou, v. 151, p. 111645. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032121009205>. Acesso em: 05 abr. 2023.

ZHAN, Q. *et al.* A fractionation strategy of cellulose, hemicellulose, and lignin from wheat straw via the biphasic pretreatment for biomass valorization. **Bioresource Technology**, Guangzhou, v. 376, p. 128887. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852423003139>. Acesso em: 05 abr. 2023.

ZHANG, C. *et al.* Oxidative torrefaction of biomass nutshells: Evaluations of energy efficiency as well as biochar transportation and storage. **Applied Energy**, Harbin, v. 235, p. 428-441. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261918316519>. Acesso em: 05 abr. 2023.

ZHANG, C. *et al.* Oxidative torrefaction of microalga *Nannochloropsis Oceanica* activated by potassium carbonate for solid biofuel production. **Environmental Research**, Harbin, v. 212, p. 113389. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013935122007162>. Acesso em: 05 abr. 2023.

ZHANG, C. *et al.* Comparative advantages analysis of oxidative torrefaction for solid biofuel production and property upgrading. **Bioresource technology**, Harbin, v. 386, p. 129531, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852423009598>. Acesso em: 05 abr. 2023.