

MARISTELA RIBEIRO DE OLIVEIRA

**Influência dos principais componentes da biomassa lignocelulósica nos parâmetros do
processo de torrefação**

Guaratinguetá

2025

Maristela Ribeiro de Oliveira

**Influência dos principais componentes da biomassa lignocelulósica nos parâmetros do
processo de torrefação**

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

Orientadora: Profa. Dra. Ivonete Ávila

Guaratinguetá/SP

2025

O48i	Oliveira, Maristela Ribeiro de Influência dos principais componentes da biomassa lignocelulósica nos parâmetros do processo de torrefação / Maristela Ribeiro de Oliveira - Guaratinguetá, 2025. 119 f : il. Bibliografia: f. 110-119 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2025. Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Ivonete Ávila 1. Biomassa. 2. Energia - Fontes alternativas. 3. Planejamento experimental. I. Título. CDU 620.91(043)
------	--

MARISTELA RIBEIRO DE OLIVEIRA

**Influência dos principais componentes da biomassa lignocelulósica nos
paramêtros do processo de torrefação.**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, para obtenção do título de Mestra em Engenharia

Data da defesa: 03/06/2025

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **IVONETE AVILA**
Data: 03/06/2025 15:38:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. IVONETE AVILA
Orientador - UNESP

Documento assinado digitalmente
 **CELSO EDUARDO TUNA**
Data: 04/06/2025 15:57:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. CELSO EDUARDO TUNA
UNESP

Documento assinado digitalmente
 **ERICA LEONOR ROMAO**
Data: 04/06/2025 08:36:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. ERICA LEONOR ROMÃO
USP

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Esta pesquisa contribui significativamente para a promoção de um modelo energético mais sustentável e eficiente, por meio do aproveitamento de resíduos lignocelulósicos amplamente disponíveis no Brasil. Ao otimizar o processo de torrefação com base em planejamentos experimentais e aprimorar as propriedades físico-químicas de biomassas, como casca de arroz, sorgo biomassa e serragem de eucalipto, o estudo viabiliza a produção de biocombustíveis sólidos com características competitivas ao carvão mineral, mas com menor impacto ambiental. O impacto social e ambiental é expressivo, além de fomentar a valorização de resíduos agrícolas, a tecnologia contribui diretamente para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa, ao substituir fontes fósseis por uma alternativa renovável. A pesquisa está alinhada com a Agenda 2030 da ONU, cumprindo requisitos dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), uma vez que a biomassa, ao ser utilizada como fonte energética renovável, se enquadra no ODS 7 que propõe o uso de energia limpa e acessível para toda a população; ODS 12 que incentiva práticas sustentáveis, como o uso de resíduos orgânicos para gerar energia e o ODS 13 incentiva a redução das emissões de gases de efeito estufa e substituição dos combustíveis fósseis. Além disso, os resultados desta pesquisa oferecem subsídios técnicos para o desenvolvimento de políticas públicas voltadas à diversificação da matriz energética brasileira, aproveitando a abundância de biomassa disponível de forma racional e eficiente.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research contributes significantly to the promotion of a more sustainable and efficient energy model by utilizing lignocellulosic residues that are widely available in Brazil. By optimizing the torrefaction process through experimental design and improving the physicochemical properties of biomasses such as rice husk, sorghum biomass, and eucalyptus sawdust, the study enables the production of solid biofuels with characteristics competitive with mineral coal, but with a lower environmental impact. The social and environmental impact is considerable. In addition to promoting the valorization of agricultural residues, the technology directly contributes to the mitigation of greenhouse gas emissions by replacing fossil fuels with a renewable alternative. The research aligns with the United Nations 2030 Agenda, meeting the goals of the Sustainable Development Goals (SDGs), as biomass, when used as a renewable

energy source, It aligns with SDG 7, which promotes the use of clean and affordable energy for all; SDG 12, which encourages sustainable practices such as the use of organic waste for energy generation; and SDG 13, which advocates for the reduction of greenhouse gas emissions and the replacement of fossil fuels. Moreover, the results of this research provide technical support for the development of public policies aimed at diversifying Brazil's energy matrix, by efficiently and rationally harnessing the country's abundant biomass resources.

DADOS CURRICULARES

MARISTELA RIBEIRO DE OLIVEIRA

NASCIMENTO	28/06/1995 – Guaratinguetá / SP
FILIAÇÃO	José Carlos Castilho de Oliveira Silvana Ribeiro de Oliveira
2012/2015	Ensino médio / Técnica em química Colégio Técnico de Lorena – EEL/USP
2016/2020	Bacharel em Química Universidade federal de Itajubá

AGRADECIMENTOS

A Deus e a Nossa Senhora, pela oportunidade, discernimento e sabedoria durante meus estudos.

Ao grupo de pesquisa do Laboratório Combustão e Captura de Carbono (LC3) do Departamento de Química Energia da FEG/UNESP e colegas de laboratório, que contribuíram e auxiliaram na elaboração deste projeto.

Em especial, minha orientadora Prof. Dr.^a Ivonete Ávila e a Miriam Ricciulli de Oliveira, pela orientação, aprendizagem e disponibilidade nas realizações das atividades do presente estudo.

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

Além disso, a pesquisa contou com apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processo nr. 315630/2021-3.

*“Comece fazendo o que é necessário, depois o que é possível,
e de repente você estará fazendo o impossível.”*

São Francisco de Assis

RESUMO

Devido aos impactos ambientais negativos causados pelo uso de combustíveis fósseis, especialmente as emissões de gases de efeito estufa, a adoção de fontes de energia renováveis tornou-se essencial. Nesse contexto, a biomassa lignocelulósica surge como uma alternativa sustentável, destacando-se pelo seu potencial de reduzir emissões e transformar resíduos orgânicos em recursos energéticos eficientes. Uma forma de melhorar as propriedades dessa biomassa e torná-la mais adequada para a geração de energia é por meio de pré-tratamentos, como a torrefação. Esse processo térmico consiste no aquecimento controlado da biomassa, em temperaturas moderadas e na ausência de oxigênio, visando facilitar sua moagem, armazenamento e transporte, além de aumentar seu valor energético por meio do aprimoramento das propriedades de combustão, conferindo-lhe características semelhantes às do biocarvão. Este estudo teve como objetivo realizar a torrefação de três tipos de biomassa lignocelulósica, casca de arroz (CA), sorgo biomassa (SB) e serragem de eucalipto (SE), utilizando métodos experimentais de delineamento de experimentos. Aplicou-se o método de Taguchi com uma matriz L9, variando-se os parâmetros de torrefação: temperatura (200, 250 e 300 °C), tempo de residência (30, 40 e 50 minutos), massa da amostra (1, 3 e 5 g) e granulometria média (83, 251 e 550 µm). O delineamento composto central rotacional (DCCR) foi empregado para otimizar a torrefação e compreender as interações entre tempo e temperatura — os parâmetros mais influentes segundo o método de Taguchi, visando maximizar o rendimento, a densidade e a eficiência energética das biomassas. Foram realizadas caracterizações físico-químicas, incluindo análise FTIR, MEV, análise elementar e determinação das propriedades de combustão, para avaliar as mudanças após a torrefação e identificar a influência dos fatores predominantes. Os resultados da análise imediata mostraram aumento no poder calorífico de 23,28% na CA, 22,94% na SB e 29,26% na SE, além de um incremento no carbono fixo de 17,02% (CA), 28,15% (SB) e 17,42% (SE). Os dados obtidos pelo método de Taguchi permitiram a identificação das condições experimentais ótimas para as variáveis de resposta. A análise de variância (ANOVA) indicou que a temperatura foi o fator mais significativo no processo de torrefação para as três biomassas. Com o DCCR, observou-se que os melhores rendimentos em massa e energia ocorreram sob condições brandas de torrefação: 200 °C por 40 minutos para CA e SB, e 215 °C por 20 minutos para SE. Para o maior rendimento energético, as condições ótimas foram 250 °C por 10 minutos para CA e SE, e 200 °C por 40 minutos para SB. No entanto, para obtenção de maior densidade energética, foi

necessário manter tempo e temperatura mais elevados: 250 °C por 10 minutos (CA), 285 °C por 20 minutos (SB) e 300 °C por 40 minutos (SE).

PALAVRAS-CHAVE: Biomassa; Torrefação; Planejamento experimental; Caracterização.

ABSTRACT

Due to the negative environmental impacts caused by the use of fossil fuels, especially greenhouse gas emissions, the adoption of renewable energy sources has become essential. In this context, lignocellulosic biomass emerges as a sustainable alternative, standing out for its potential to reduce emissions and convert organic waste into efficient energy resources. One way to improve the properties of biomass and make it more suitable for energy generation is through pretreatment methods such as torrefaction. This thermal process involves the controlled heating of biomass at moderate temperatures in the absence of oxygen to facilitate its grinding, storage, and transport, while increasing its energy value by enhancing combustion properties and imparting characteristics similar to biochar. This study aimed to carry out the torrefaction of three types of lignocellulosic biomass, rice husk (RH), sorghum biomass (SB), and eucalyptus sawdust (ES), using experimental design methods. The Taguchi method was applied with an L9 orthogonal array, varying torrefaction parameters: temperature (200, 250, and 300 °C), residence time (30, 40, and 50 minutes), sample mass (1, 3, and 5 g), and particle size (83, 251, and 550 μm). The central composite rotational design (CCRD) was used to optimize torrefaction and understand the interactions between time and temperature, the most influential parameters according to the Taguchi method in order to maximize biomass yield, density, and energy efficiency. Physicochemical characterizations were carried out, including FTIR, SEM, elemental analysis, and combustion property determination, to evaluate the changes after torrefaction and identify the influence of predominant factors. Proximate analysis results showed increases in higher heating value (HHV) of 23,28% for RH, 22,94% for SB, and 29,26% for ES, and increases in fixed carbon content of 17,02% (RH), 28,15% (SB), and 17,42% (ES). The data obtained using the Taguchi method allowed for the identification of optimal experimental conditions for the response variables. ANOVA results indicated that temperature was the most significant factor in the torrefaction process for all three biomasses. According to the CCRD, the highest mass and energy yields were observed under mild torrefaction conditions: 200 °C for 40 minutes for RH and SB, and 215 °C for 20 minutes for ES. For maximum energy yield, the optimal conditions were 250 °C for 10 minutes for RH and ES, and 200 °C for 40 minutes for SB. However, higher energy density required higher temperature and time: 250 °C for 10 minutes (RH), 285 °C for 20 minutes (SB), and 300 °C for 40 minutes (ES).

KEYWORDS: Biomass; Torrefaction; Experimental planning; Characterization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação da pesquisa científica.....	23
Figura 2 - Evolução do número de documentos publicados por ano.....	27
Figura 3 - Número de documentos por países	27
Figura 4- Equipamentos utilizados na preparação das biomassas: (a) moinho de facas e (b) agitador de peneiras	49
Figura 5 - Fluxograma simplificado da metodologia utilizada para determinar a composição química da biomassa lavada e amostras obtidas no tratamento químico	50
Figura 6 - Conjunto de extração via processo Soxhlet	52
Figura 7 - Espectrofotômetro de UV-visível utilizado para a determinação do teor de lignina solúvel.....	53
Figura 8 - Cromatógrafo líquido e seus módulos	54
Figura 9 - Cadinho com cinzas totais (a) e mufla (b)	56
Figura 10 - Sistema de Análise Térmica Simultâneo (TGA-DTA-DSC) -	57
Figura 11 - Bomba calorimétrica.....	58
Figura 12 - Reator tubular vertical	61
Figura 13 – Avaliação visual das biomassas <i>in natura</i> (CA, SE e SB) na forma como recebidas e após moagem	68
Figura 14 - Espectro de FTIR das biomassas <i>in natura</i> : CA, SE e SB	70
Figura 15 - Imagens de MEV (ampliação de 500 e 2000x) das amostras de biomassas <i>in natura</i> : CA, SE e SB.....	71
Figura 16 - Avaliação visual das amostras de CA, SE e SB após a torrefação	75
Figura 17 - Espectro de FTIR das biomassas CA, SE e SB torrificadas	81
Figura 18 - Imagens de MEV (ampliação de 2000x) das amostras torrificadas: CA (a) 200 °C EXP1; (b) 250 °C EXP5 e (c) 300 °C EXP9 - SE (d) 200 °C EXP1; (e) 250 °C EXP5 e (f) 300 °C EXP9 - SB (g) 200 °C EXP1; (h) 250 °C EXP5 e (i) 300 °C EXP9.....	83

Figura 19 - Efeitos dos fatores sobre a média (M) e sinal/ruído (S/N) das variáveis, rendimento (RM), carbono fixo (CF), poder calorífico superior (PCS) e materiais voláteis (MV): amostra CA torrificada.....	86
Figura 20 - Efeitos dos fatores sobre a média (M) e sinal/ruído (S/N) das variáveis, rendimento (RM), carbono fixo (CF), poder calorífico superior (PCS) e materiais voláteis (MV): amostra SE torrificada.....	86
Figura 21 - Efeitos dos fatores sobre a média (M) e sinal/ruído (S/N) das variáveis, rendimento (RM), carbono fixo (CF), poder calorífico superior (PCS) e materiais voláteis (MV): amostra SB torrificada	87
Figura 22 - Superfície de resposta e linhas de contorno para RM: (a) CA, (b) SE e (c) SB ..	101
Figura 23 - Superfície de resposta e linhas de contorno para RE: (a) CA, (b) SE e (c) SB ...	104
Figura 24 - Superfície de resposta e linhas de contorno para DE: (a) CA, (b) SE e (c) SB ...	107

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Refinamento de campos de busca realizado na plataforma de dados <i>Scopus</i>	26
Quadro 2 - Metodologias e resultados encontrados dos artigos selecionados.....	29
Quadro 3 - Composição química dos principais componentes de algumas biomassas <i>in natura</i> estudadas na literatura	34
Quadro 4 - Propriedades físico-química das biomassas <i>in natura</i> estudadas na literatura.....	35
Quadro 5 - Resumo da literatura sobre torrefação.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores dos fatores e níveis.....	63
Tabela 2 - Matriz ortogonal Taguchi L9	63
Tabela 3 - Fatores e níveis codificados do planejamento experimental do DCCR: 2 ²	64
Tabela 4 - Matriz de planejamento experimental do DCCR	65
Tabela 5 - Composição química das biomassas <i>in natura</i> : CA, SE e SB.....	68
Tabela 6 - Propriedades físico-químicas das biomassas <i>in natura</i> : CA, SE e SB.....	69
Tabela 7 - Índices de combustão para as biomassas <i>in natura</i> : CA, SE e SB.....	72
Tabela 8 - Valores reais dos fatores definidos para os três níveis.....	73
Tabela 9 - Matriz ortogonal Taguchi L9	74
Tabela 10 - Valores médios análise imediata e poder calorífico superior das amostras CA, SE e SB torrificadas	76
Tabela 11 - Valores dos índices de combustão das amostras CA, SE e SB torrificadas.....	79
Tabela 12- Análise elementar (% massa -base seca) das biomassas CA, SE e SB torrificadas.....	80
Tabela 13 - Efeitos dos fatores sobre a média (M) e sinal/ruído (S/N) para as amostras CA, SE e SB torrificadas	85
Tabela 14 - Condição de melhor ajuste das amostras CA, SE e SB torrificadas para as variáveis respostas RM, CF e PCS	88
Tabela 15 - Validação dos experimentos das melhores condições de ajuste para as amostras CA, SE e SB torrificadas	89
Tabela 16 - Composição química das amostras CA, SE e SB torrificadas para as condições de melhor ajuste.....	90
Tabela 17 - Análise ANOVA para RM	92
Tabela 18 - Análise ANOVA para CF.....	93
Tabela 19 - Análise ANOVA para PCS	94
Tabela 20 - Análise ANOVA para MV	95
Tabela 21 - Fatores e níveis codificados do planejamento experimental do MSR.....	96

Tabela 22 - Matriz experimental e respostas do planejamento composto central	98
Tabela 23 - Análise ANOVA e regressão para RM	100
Tabela 24 - Análise ANOVA e regressão para RE	103
Tabela 25 - Análise ANOVA e regressão para DE	106

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	20
1.2	MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	22
1.3	OBJETIVOS	23
1.4	CLASSIFICAÇÃO E LIMITAÇÃO DA PESQUISA	23
1.5	CONTRIBUIÇÕES E INEDITISMO DA PESQUISA	24
1.5.1	Contribuições esperada.....	24
1.5.2	Ineditismo da pesquisa.....	25
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO	31
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	32
2.1	BIOMASSA E SEUS PRINCIPAIS COMPONENTES.....	32
2.2	BIOMASSA DE INDÚSTRIA FLORESTAL E AGROINDÚSTRIA.....	33
2.2.1	Casca de arroz	36
2.2.2	Serragem de eucalipto.....	37
2.2.3	Bagaço de sorgo biomassa	38
2.3	PROCESSO DE TORREFAÇÃO DA BIOMASSA	39
2.4	INFLUÊNCIA DA TORREFAÇÃO NA ESTRUTURA DA BIOMASSA	42
2.5	ASPECTOS ENERGÉTICOS DA TORREFAÇÃO	43
2.6	PESQUISAS DESENVOLVIDAS PELO GRUPO DE PESQUISA.....	44
2.7	AValiação DA LITERATURA CONSULTADA.....	46
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	49
3.1	MATÉRIA PRIMA E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	49
3.2	DETERMINAÇÃO DOS CONSTITUINTES DAS BIOMASSA	50
3.2.1	Determinação dos sólidos totais	51
3.2.2	Determinação do teor de extrativos	51
3.2.3	Determinação do teor de carboidratos e lignina.....	52
3.2.3.1	Determinação dos teores de cinzas estruturais e de lignina insolúvel.....	53
3.2.3.2	Determinação do teor de lignina solúvel	53
3.2.3.3	Determinação de carboidratos	54
3.2.4	Determinação do teor de cinzas totais	55
3.3	CARACTERIZAÇÕES FÍSICO-QUÍMICAS DAS BIOMASSAS	56

3.3.1	Análise termogravimétrica	56
3.3.2	Análise imediata	57
3.3.3	Análise elementar	58
3.3.4	Poder calorífico superior	58
3.3.5	Espectroscopia de infravermelho com transformada de fourier (FTIR)	59
3.3.6	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	59
3.4	ÍNDICE COMBUSTÃO DAS BIOMASSAS	60
3.5	PROCEDIMENTO DE TORREFAÇÃO DAS BIOMASSAS	60
3.5.1	Eficiência da torrefação	61
3.6	PLANEJAMENTOS EXPERIMENTAIS	62
3.6.1	Método de Taguchi	62
3.6.2	Delineamento composto central rotacional (DCCR)	64
3.7	ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)	66
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
4.1	CARACTERIZAÇÃO DAS BIOMASSAS <i>IN NATURA</i>	68
4.2	ÍNDICE DE COMBUSTÃO DAS BIOMASSAS <i>IN NATURA</i>	71
4.3	MÉTODO DE TAGUCHI APLICADO À TORREFAÇÃO DAS BIOMASSAS... ..	72
4.3.1	Definição fatores e valores reais para os níveis	72
4.3.1.1	Avaliação visual das amostras torrificadas	74
4.3.1.2	Análise imediata e poder calorífico superior das amostras torrificadas	75
4.3.1.3	Índices de combustão das amostras torrificadas	78
4.3.1.4	Análise elementar das amostras torrificadas	80
4.3.1.5	Análise de FTIR das amostras torrificadas	81
4.3.1.6	Imagens MEV das amostras torrificadas	82
4.3.2	Variáveis de interesse utilizadas para a otimização da torrefação	83
4.3.2.1	Efeitos dos fatores sobre a média (M) e sinal/ruído (S/N)	83
4.3.2.2	Melhores condições de ajuste	87
4.3.2.3	Validação das melhores condições de ajuste	88
4.3.2.4	Composição química das amostras nas melhores condições de ajustes	90
4.3.3	Análise de variância (ANOVA) para o método de Taguchi	91
4.4	DELINEAMENTO COMPOSTO CENTRAL ROTACIONAL (DCCR)	96
4.4.1	Análise do rendimento em massa (RM%)	99
4.4.2	Análise do rendimento energético (RE%)	102

4.4.3	Análise da densidade energética (DE%)	105
5	CONCLUSÃO	109
	REFERÊNCIAS.....	111

1 INTRODUÇÃO

1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A cada ano a demanda energética cresce rapidamente. Dados do relatório do balanço energético nacional publicado em 2024, indicam que a oferta interna de energia aumentou 3,6% em relação a 2022, a participação de fontes renováveis na matriz energética brasileira atingiu 49,1%, superior à média mundial de 14,7%, esse crescimento foi impulsionado pelo aumento expressivo na oferta de biomassa, bem como das fontes eólica e solar (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2024a).

Uma vez que os combustíveis provenientes do petróleo ainda são os mais utilizados na matriz energética nacional, os níveis de emissão de gases do efeito estufa (GEE) estão mais altos. Em 2024, por exemplo, as emissões de dióxido de carbono chegaram à ordem de 41,6 bilhões de toneladas, sendo cerca de 37,4 bilhões de toneladas provenientes da queima de combustíveis fósseis (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2024b).

As emissões e queimas de GEE são os principais impactos que influenciam as mudanças climáticas e agravam o aquecimento global. O aquecimento global é prejudicial para o equilíbrio da Terra, uma vez que o superaquecimento causa aumento no nível do mar, acidificação dos oceanos, derretimento da calota de gelo, mudanças no florescimento de flores e plantas, eventos climáticos como furacões, enchentes e tornados (LE RAVALEC *et al.*, 2022).

Outro fator agravante para o aquecimento global é o setor de transportes, que no Brasil é responsável pela emissão de 85 MtCO₂ por ano, sendo este valor é maior do que todos os gases GEE liberados pelas termelétricas no país (AGUIAR *et al.*, 2021). Diante do avanço do aquecimento global, causado principalmente pelos gases do efeito estufa provenientes da utilização de combustíveis fósseis, se faz necessário medidas urgentes para conter tais avanços e problemas ambientais futuros.

A busca por transições energéticas de combustíveis petroquímicos são umas das principais preocupações mundiais. Pesquisas vêm buscando incentivar a utilização de combustíveis renováveis e biocombustíveis que, se comparados às fontes convencionais, produzem menos poluentes. Energias renováveis geralmente são de fácil obtenção e sua utilização diminui a emissão de poluentes, pois estão em constante regeneração e são facilmente encontradas na natureza (GUEDES *et al.*, 2021a).

Dentre as energias renováveis, pode-se citar a energia eólica, proveniente de força do vento; solar, proveniente da luz solar; hidrelétrica, proveniente do movimento das águas dos rios; geotérmica, proveniente do calor da terra; oceânica, proveniente das ondas oceânicas e a energia de biomassa, proveniente de matéria orgânica e vegetal (INTELBRAS, 2021).

De acordo com Centro Nacional de Referência em Biomassa (CENBIO), define-se biomassa como recurso renovável oriundo de matéria orgânica capaz de produzir energia, sendo esta definição considerada para este trabalho.

A biomassa no Brasil é considerada a principal matéria-prima para substituir e atender a demanda de biocombustíveis, uma vez que é classificada como fonte de energia primária renovável de fácil obtenção, utilizada para produzir combustíveis, eletricidade e calor (YANG; LÜ, 2021). No ano de 2022, o uso da biomassa de cana-de-açúcar na geração de energia foi de 15,4%, porcentagem maior que todas as outras fontes renováveis existentes no país (EPE, 2023). Em 2023, a bioeletricidade gerada a partir do bagaço e da palha da cana-de-açúcar atingiu 20.973 gigawatt-hora, representando um aumento de 14% em relação a 2022 (UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR E BIOENERGIA (UNICA), 2024).

Assim como a cana-de-açúcar o uso de outros materiais lignocelulósicos tem sido uma solução para atender as necessidades energéticas e diminuir os gases GEE, visto que na queima da biomassa, o carbono proveniente das espécies vegetais retorna ao meio ambiente, não causando grandes prejuízos se comparados a combustão de petróleo e derivados (GUEDES *et al.*, 2021b). Dentre as vantagens de se implementar a biomassa como fonte de energia, estão a sua abundância de diversidade de matéria-prima, seu baixo custo de aquisição, fácil armazenamento, transporte, e menor complexidade nos processos de conversão em energia (VUPPALADADIYAM *et al.*, 2022a).

Em relação às aplicações da biomassa, seu principal uso é na produção de bioetanol com menor valor agregado. A diminuição no valor do produto é consequência do aproveitamento de resíduos industriais e agrícolas produzidos diariamente em grandes quantidades no processo de fermentação (PERIYASAMY *et al.*, 2023). Outro exemplo de utilização da biomassa é para a produção de bio-óleo, biocarvão e gás de síntese, produtos do processo de pirólise de biomassas, que assim como o bioetanol possui alto valor agregado para gerar energia podendo substituir o carvão e gás natural (VUPPALADADIYAM *et al.*, 2022b).

Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, do inglês *International Energy Agency*), em 2023 houve expansão de 50% da capacidade de geração de energia renovável no

mundo em relação a 2022. A implementação de combustíveis renováveis, como a biomassa, pode ser uma solução para suprir uma parte da demanda de energia de forma menos prejudicial ao planeta, sendo boas as perspectivas para utilização de biocombustíveis, a demanda deverá aumentar em 28% nos próximos cinco anos (IEA, 2022; WISNIEWSKI *et al.*, 2009).

Atualmente existem pré-tratamentos que contribuem para um melhor rendimento da biomassa como combustível, neste trabalho destaca-se a torrefação. Na torrefação a biomassa passa por tratamento térmico, com temperatura entre 200 °C e 300 °C em condições de ausência de oxigênio (GONZÁLEZ MARTÍNEZ *et al.*, 2022).

Na torrefação ocorre as quebras das estruturas fibrosas da biomassa, fazendo com que ela perca massa e que o produto energético se mantém, com isso a densidade energética se torna maior que a biomassa *in natura*, devido a remoção de compostos voláteis, umidade e aumento da concentração de compostos carbônicos (VAN DER STELT *et al.*, 2011a). A torrefação também melhora as propriedades físico-químicas da biomassa, aumentando seu poder calorífico, o teor de carbono, homogeneidade e resistência à degradação biológica, bem como redução das matérias voláteis. Por utilizar condições brandas, a torrefação apresenta maiores rendimentos de massa sólida e produtividade em comparação com a pirólise, onde são utilizadas temperaturas mais altas (DA SILVA *et al.*, 2018).

1.2 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

A principal motivação do estudo é melhorar as características da biomassa como fonte energética, pela aplicação do pré-tratamento de torrefação, visto que é o terceiro recurso energético mais abundante no mundo, depois do carvão e derivados do petróleo (GUEDES *et al.*, 2021b).

É notório que a biomassa pode ser usada para produção de energia no Brasil, e isso ocorre devido suas vantagens e benefícios, dentre os quais está o baixo valor agregado para se gerar energia (GUEDES *et al.*, 2021b) e facilidade no transporte da biomassa, uma vez que a matéria-prima pode ser encontrada em diversas regiões do país (ARAUJO *et al.*, 2022a). Tem-se também que a biomassa é uma fonte energética, que pode ser densificada quando submetida a pré-tratamentos que aumentam sua eficiência energética ao ser submetida em processos de queima, tornando-a uma fonte de energia mais promissora (ARAUJO *et al.*, 2022b).

Outro ponto positivo na utilização da biomassa é o grande volume de matérias-primas

facilmente encontradas em setores da agricultura, industriais e florestais, são inúmeros os resíduos provenientes desses setores que podem ser aplicados para gerar energia ao invés de serem utilizados de forma incorreta (ARAÚJO *et al.*, 2022b).

Considerando o exposto anteriormente, neste trabalho de mestrado busca-se responder a seguinte questão da pesquisa: *o pré-tratamento de torrefação de biomassas lignocelulósicas pode melhorar suas características como biocombustível?*

1.3 OBJETIVOS

Este estudo tem por objetivo geral aprimorar a qualidade de biocombustíveis utilizando o processo de torrefação de biomassas lignocelulósicas.

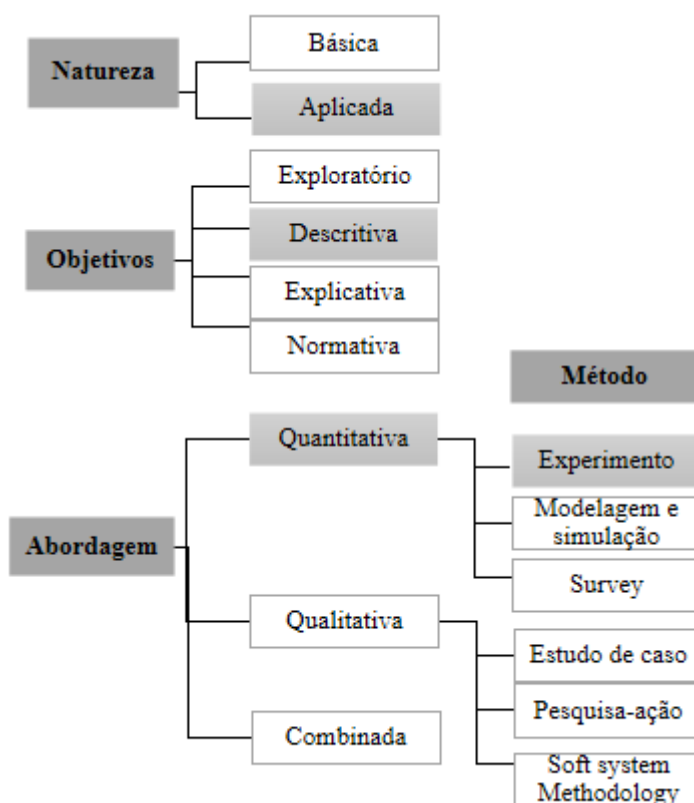
Para atingir o objetivo geral, propõem-se os seguintes objetivos específicos:

1. Proceder a caracterização físico-química e determinar as propriedades de combustão de três tipos de biomassas lignocelulósicas, casca de arroz, bagaço de sorgo biomassa e serragem, para o estudo a fim de comparar suas propriedades como biocombustíveis;
2. Realizar os ensaios de torrefação em um reator tubular vertical considerando um planejamento experimental L9 de Taguchi e proceder a caracterização físico-química das amostras a fim de identificar as variáveis respostas, bem como determinar a influência dos fatores predominantes no processo;
3. Aplicar o método composto central rotacional para otimizar o processo de torrefação pela identificação das interações entre variáveis mais significantes determinadas pelo método de Taguchi.

1.4 CLASSIFICAÇÃO E LIMITAÇÃO DA PESQUISA

A classificação da pesquisa científica é apresentada na Figura 1

Figura 1 - Classificação da pesquisa científica



Fonte: Adaptado de (TURRIONI; MELLO, 2012)

O trabalho foi classificado de acordo com as definições descritas na literatura (TURRIONI; MELLO, 2012). Quanto à natureza, classifica-se como uma pesquisa aplicada, ou seja, os resultados serão aplicados para resolução de problemas que ocorrem na realidade.

Em relação aos objetivos, classifica-se este trabalho como empírico descritivo, visto que serão realizados experimentos práticos reais, onde se estabelecerá relação entre variáveis por meio de planejamentos experimentais.

No que se refere à abordagem e método deste trabalho, uma vez que serão analisados dados numéricos de amostras, utilizando métodos estatísticos, a abordagem é classificada como quantitativa. O método é dito como experimental, pois serão analisadas a influência e efeitos de variáveis no processo.

1.5 CONTRIBUIÇÕES E INEDITISMO DA PESQUISA

1.5.1 Contribuições esperada

Segundo estudo da Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa, a geração de

resíduos do beneficiamento agroindustrial é um grande problema ambiental, social e econômico no Brasil, a estimativa de resíduos gerados pelo setor agroindustrial é de 967.005.044 mil toneladas por ano. Em 2022 os resíduos foram da ordem de 1090 mil bep/dia e podem chegar a 1,5 milhões bep/dia ¹até 2030 (BIOMASSA, 2022). Assim, este estudo contribui para a sustentabilidade ambiental.

O estudo em questão também busca atender os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) que fazem parte da chamada “Agenda 2030” assinada pela Cúpula das Nações Unidas em 2015, dentre os objetivos a pesquisa busca atender dois: a ODS 7 e 13 (NAÇÕES UNIDAS BRASIL, 2020a).

A ODS 7 visa a utilização de energia limpa e acessível, garantia de acesso à energia barata, confiável, sustentável e renovável para todos, considerando o uso da biomassa para produção de energia, a mesma se enquadra nesses requisitos uma vez que é uma fonte mais barata, acessível, sustentável e renovável (ARAUJO *et al.*, 2022b; NAÇÕES UNIDAS BRASIL, 2020b).

A ODS 13 incentiva a tomada de medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos, utilizando-se energia de biomassa haverá uma diminuição da emissão de gases do efeito estufa que provocam o aquecimento das temperaturas globais, e consecutivamente uma diminuição de mudanças climáticas que causam fortes desastres naturais prejudicando social e economicamente a população (NAÇÕES UNIDAS BRASIL, 2020b).

Diante dos dados mencionados, o projeto proposto contribui para a valorização dos resíduos das biomassas lignocelulósicas, uma vez que expõe os benefícios da utilização da biomassa como fonte de energia e estuda as mudanças ocorridas em sua composição química após o processo de torrefação.

1.5.2 Ineditismo da pesquisa

Para avaliar o ineditismo da pesquisa, realizou-se uma análise das principais publicações da literatura envolvendo a torrefação de biomassas lignocelulósicas, utilizando a plataforma de dados *Scopus*. Os dados foram extraídos em abril de 2025.

No Quadro 1 estão os resultados da busca realizada a partir dos refinamentos envolvidos no tema da pesquisa. O período de busca foi entre 2018 e abril de 2025. Definiu-se o campo de

¹ Barril equivalente de petróleo

busca entre palavras-chaves, títulos e resumo. Primeiramente buscou-se por “*Torrefaction*”, depois refinou-se utilizando os termos “*Biomass lignocellulosic*” e “*Cellulose*”; “*Lignin*”; “*Hemicellulose*”. Após seleção da área, tipo de documento e linguagem, obteve-se 652 artigos.

Quadro 1 - Refinamento de campos de busca realizado na plataforma de dados *Scopus*

Campos de busca	Palavras de pesquisa	Resultados
Título, palavra-chave, resumo	<i>Torrefaction</i>	2.518
Refino	<i>Lignocellulosic biomass</i>	1.627
Refino	<i>Cellulose OR lignin OR hemicellulose</i>	1.233
Área	<i>Energy</i>	799
Tipo de documento	<i>Article</i>	657
Linguagem	<i>English</i>	652

Fonte: Autoria própria, com base nos dados disponibilizados no *Scopus*

Pela análise dos resultados da pesquisa, observa-se pela Figura 2 a evolução no número de publicações durante os anos da busca, até 2021 houve um aumento, porém nos anos seguintes há um decréscimo no número de publicações de 106 publicações em 2022 para 40 até o mês de abril de 2025.

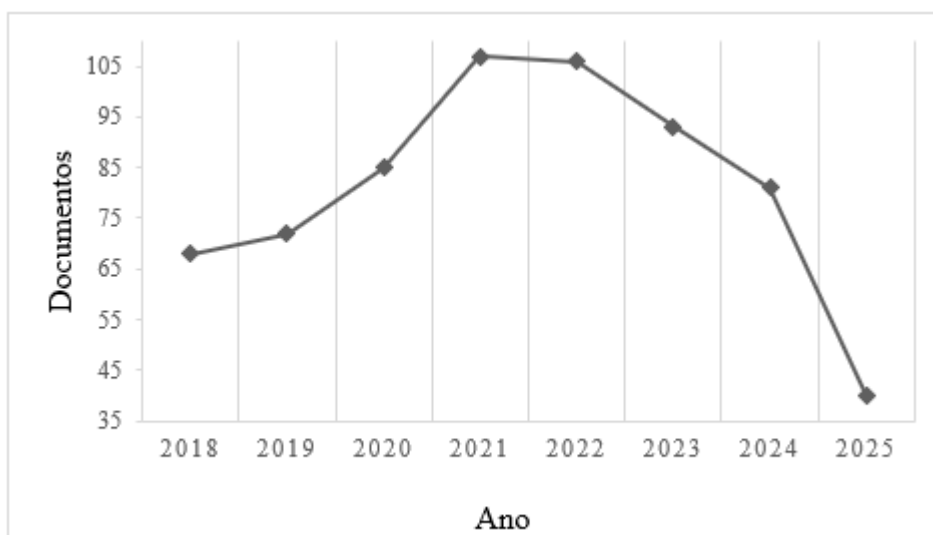
Outro ponto abordado é apresentado na Figura 3, são os países que mais publicaram sobre o tema, em primeiro lugar está a China com 241 publicações, o Brasil apresenta apenas 29 publicações. Tais fatos sugerem novas perspectivas e oportunidades de desenvolvimento do tema em estudo no país.

Dos 652 artigos refinados, escolheu-se os com mais de 50 citações para análise do título de cada artigo. De 96 artigos com mais de 50 citações, 46 tinham títulos interessantes para o tema da pesquisa proposta. Alguns desses artigos foram lidos e as condições de torrefação, biomassa e principais resultados encontrados pelos autores são apresentados no Quadro 1.

A partir das análises dos artigos, observa-se que a maioria utiliza a torrefação para melhorar as características da biomassa para uma futura aplicação. No estudo proposto, além de utilizar o pré-tratamento para melhorar as propriedades de três tipos de biomassa lignocelulósica, o processo será executado com auxílio de planejamentos experimentais, de

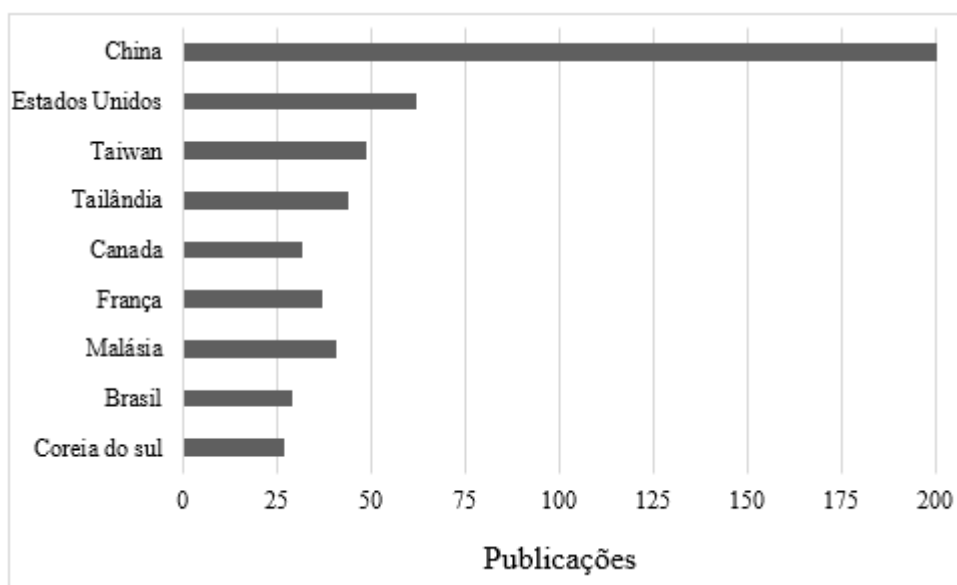
Taguchi e Superfície de Resposta, a fim de aprimorar os melhores parâmetros de torrefação para as biomassas em estudo. O uso de planejamentos de experimentos foi encontrado em apenas um artigo dentro da busca e refino realizado.

Figura 2 - Evolução do número de documentos publicados por ano



Fonte: Autoria própria, com base nos dados disponibilizados no *Scopus*

Figura 3 - Número de documentos por países



Fonte: Autoria própria, com base nos dados disponibilizados no *Scopus*

Além de aprimorar o pré-tratamento, será estudado as mudanças na composição química das biomassas torradas, mediante análises de caracterização química e física, para estudos de futuras aplicações de bioenergia.

Quadro 2 - Metodologias e resultados encontrados dos artigos selecionados

(continua)

Autores	Biomassa	Condições de torrefação	Principais Resultados
(CHEN, D. <i>et al.</i> , 2018)	Casca de arroz	Reator de leito fixo; 210 a 300 °C; 30 min	A remoção do oxigênio após a torrefação melhorou as propriedades combustíveis da casca de arroz. Na faixa de 210 – 300 °C; 9,5 a 63,2% do oxigênio foi removido migrando para produtos gasosos e líquidos.
(HE <i>et al.</i> , 2019)	Madeira de Pinho	Reator de leito fixo; 200; 250; 300 °C; 60 min	A madeira torrada a 250 °C apresentou teor de celulose e grau cristalino maior, enquanto os voláteis foram reduzidos em 4%. O desempenho de volatilização e transferência de calor foram melhorados após a torrefação.
(WANG <i>et al.</i> , 2018)	Abeto norueguês (Picea abies)	Reator tubular; 225; 275 e 300 °C; 30 e 60 min	A torrefação melhorou o valor calorífico da biomassa, bem como o teor de carbono fixo. Os teores de hemicelulose e celulose diminuíram com o aumento da temperatura, já o teor de lignina aumentou.
(BARZEGAR <i>et al.</i> , 2020)	Cavacos de madeira de pinus	Reator tipo parafuso; 250; 300 e 350 °C; 15 e 30 min	Após análise cinética, os valores de energia de ativação aumentaram durante a degradação da hemicelulose, permaneceu constante com a decomposição da celulose e diminuiu com a decomposição da lignina. A maior energia de ativação foi de 183,40 kJ/mol para biomassa, em 250 °C-30 min e o menor valor foi de 72,93 kJ/mol para biomassa em 350 °C-15 min.
(CHEN <i>et al.</i> , 2020)	Casca de arroz	Reator de leito fixo; 220; 260 e 300 °C; 30 min	Na torrefação não oxidativa da biomassa ocorreu decomposição térmica, já no processo de torrefação oxidativa, a biomassa sofre decomposição térmica, bem como oxidação e até combustão. A torrefação oxidativa possui aplicações industriais práticas e tem potencial para reduzir custos operacionais.
(CHEN, W. H. <i>et al.</i> , 2018)	Serragem de seringueira	Tubo de pirólise; 200; 250 e 300 °C; 10 min	Pela análise de Py-GC/MS, a hemicelulose foi obviamente degradada pela torrefação a 200 e 250 °C, a decomposição da lignina também foi pronunciada a 300 °C. Outra observação foi que com o aumento da temperatura de torrefação menos compostos estavam contidos nos bio-óleos de pirólise
(ONG <i>et al.</i> , 2021)	na	na	No artigo de revisão parâmetros que mais desempenham influência no produto da biomassa são a temperatura e tempo de residência. As análises de caracterização são aliadas para prever ótimas condições para aprimorar o processo de torrefação da biomassa lignocelulósica.
(TIAN <i>et al.</i> , 2020)	Espigas de milho	Forno tubular (OTF-1200X); 210; 240; 270 e 300 °C - 30 min	O produto torrado a 300 °C contém a maior densidade energética, porém possui rendimento mássico e energético menor. Para obter o máximo de benefícios econômicos, 240 °C é a melhor temperatura de torrefação que apresenta rendimento mássico de 62,36% e rendimento energético de 76,04%.
(SINGH, S. <i>et al.</i> , 2020)	Madeira de Acacia nilotica	Reator de leito fixo de quartzo; 220 a 280 °C; 20 a 60 mins	A torrefação a 280 °C por 40 min, aumentou o poder calorífico em 28,2% da biomassa. Descobriu-se que a Acacia nilótica torrada é menos higroscópica e houve diminuição significativa de matéria volátil (57,4%) com aumento simultâneo de matéria fixa e teor de carbono em 4 vezes.

(conclusão)

Autores	Biomassa	Condições de torrefação	Principais Resultados
(LI <i>et al.</i> , 2018)	Sabugo de milho	Reator tubular horizontal de tubo de quartzo; 220; 260 e 300 °C; 30 min	A torrefação em 300 °C levou a uma redução notável no teor de carboidratos e na cristalinidade. Outro ponto abordado foi que o tempo para a combustão foi reduzido após a torrefação.
(MAMVURA <i>et al.</i> , 2018)	Sementes de marula e madeira de goma azul	Forno tubular; 200 e 300 °; 20 e 60 min	Para a semente de marula, em 275 °C, a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min e 20 min foi a condição em que a biomassa apresentou propriedades comparáveis às do carvão. Para madeira de goma azul, em 300 °C, a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min e 40 min, proporcionou uma biomassa ideal que poderia ser queimada com carvão (<i>co-firing</i>) em diferentes proporções para produção de energia.
(SINGH, R. K. <i>et al.</i> , 2020c)	Caule do feijão bóer	Reator tubular de quartzo; 225; 250 e 275 °C; 15; 30 e 45 min	Na temperatura de 250 °C obteve-se melhores rendimentos sólidos em relação a temperaturas mais altas. O poder calorífico aumentou 28,6% na biomassa torrada a 275 °C por 45 min.
(SINGH, S. <i>et al.</i> , 2019)	Madeira Acacia nilotica	Reator de leito fixo; 220; 250 e 280 °C; 20; 40 e 60 min	Após o uso do método de superfície e resposta, os valores ótimos de temperatura, tempo de residência e taxa de aquecimento para obtenção do valor máximo de rendimento sólido e poder calorífico foram 252°C, 60 min e 5 °C/min. O efeito da temperatura foi mais significativo, enquanto o efeito do tempo de residência e da taxa de aquecimento foram mínimos.
(KAI <i>et al.</i> , 2019)	Palha de arroz	Reator de nitrogênio; 200; 225; 250; 275 e 300 °C; 10, 30, 50 e 70 min	O rendimento de sólidos foi reduzido de 94,35% para 88,66% na faixa de 200-250 °C, e de 88,66% para 70,49% na faixa de 250-300 °C. Quando a temperatura foi superior a 225 °C, o rendimento energético foi reduzido de 98,52% para 84,41% e na faixa de 225-300 °C, e o grau de diminuição no rendimento energético foi aumentado com o aumento da temperatura.

Fonte: Autoria própria

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

A dissertação está dividida em 5 capítulos, o primeiro capítulo é uma introdução do projeto de pesquisa, seguido do segundo capítulo de revisão bibliográfica sobre os principais temas abordados. No terceiro capítulo contém toda metodologia prática e teórica utilizada para execução dos experimentos e planejamento experimental. O quarto capítulo aborda os resultados das análises práticas e dos planejamentos experimentais, bem como a discussão e caracterização dos resultados. Por último, o quinto capítulo apresenta as principais conclusões seguido das referências bibliográficas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BIOMASSA E SEUS PRINCIPAIS COMPONENTES

As fontes de biomassa podem ser separadas em três grupos, as biomassas vegetais não lenhosas, que são classificadas de acordo com sua principal substância de armazenamento de energia, como os sacarídeos, celulósicas, amiláceos e aquáticos. O segundo grupo são as biomassas vegetais lenhosas, classificadas como capazes de produzir madeira como tecido de suporte, encontradas em florestas nativas ou plantadas. Por fim, o grupo das biomassas de resíduos orgânicos, sendo eles resíduos agropecuários, urbanos e resíduos agroindustriais (GRUPO DE PESQUISA EM BIOENERGIA, 2009a).

Estes três grupos de biomassa são aproveitados de diversas formas, entre as finalidades mais comuns são para combustão direta, processos termoquímicos (gaseificação, pirólise, liquefação, transesterificação) ou processos biológicos (digestão anaeróbica) (NOGUEIRA, 2005a).

O Brasil é um dos países com mais potencial para desenvolvimento da cadeia produtiva de biomassa, devido à grande disponibilidade de terras aráveis e das condições climáticas favoráveis, que permitem a produção sustentável de biomassa lignocelulósica em grande diversidade. Em relação à questão social, a biomassa no Brasil gera empregos nas zonas rurais, uma vez que em sua maioria são provenientes de resíduos agrícolas, favorecendo assim os trabalhadores do campo, garantindo a geração de renda local (VAN DER STELT *et al.*, 2011b).

As principais fontes de energia obtidas a partir da biomassa são o etanol, biodiesel, dendro energia e biogás. A obtenção do etanol consiste na degradação das fibras de bagaço ou palha de cana-de-açúcar por meio de processos ácidos ou enzimáticos; o biodiesel é produzido via reações de transesterificação e craqueamento de matérias-primas como óleos vegetais. A dendroenergia é a energia empregada utilizando-se a madeira e seus derivados, como troncos e podas, já o biogás é formado pela degradação da matéria orgânica, sendo uma mistura rica em metano, constituinte importante no gás natural combustível (GRUPO DE PESQUISA EM BIOENERGIA, 2009b; NOGUEIRA, 2005b).

A biomassa vegetal possui estrutura fibrosa com constituição química heterogênea, composta principalmente por hemicelulose, lignina e celulose, bem como materiais inorgânicos e extrativos orgânicos (BUI *et al.*, 2015; ONG *et al.*, 2021).

A hemicelulose refere-se aos polímeros de polissacarídeos, com menor grau de polimerização em comparação a celulose. Sua estrutura contém açúcares como, d-xilopirranose; d-glucopirranose; d-galactopirranose; I-arabinofuranose, d-manopirranose. Sua temperatura de decomposição está entre 220° e 315 °C (LU *et al.*, 2012a; SCHELLER; ULVSKOV, 2010).

A estrutura da celulose é dada por um polímero glucano, homopolissacarídeo linear composto por unidades de β -D-glicopirranose ligadas por ligações (1, 4)-glicosídicas (BALAT *et al.*, 2008a). Devido às moléculas de celulose tenderem a formar ligações de hidrogênio há uma maior estabilidade térmica da celulose comparado à hemicelulose, sendo sua temperatura de decomposição entre 260 °C e 400 °C (BACH; SKREIBERG, 2016).

A lignina é uma substância ramificada, tridimensional, amorfa e polifenólica, formada por biossíntese irregular de três monômeros fenilpropanóides básicos, que fazem ligação entre hemicelulose e estruturas da celulose. A lignina é termicamente estável, sua decomposição térmica está na faixa de 160 °C a 900 °C (CHEN; KUO, 2011a; LU *et al.*, 2012b; ONG *et al.*, 2021).

2.2 BIOMASSA DE INDÚSTRIA FLORESTAL E AGROINDÚSTRIA

A biomassa proveniente da indústria florestal e/ou agroindústria é uma fonte valiosa e versátil de energia renovável. Seu uso adequado não apenas contribui para a diversificação da matriz energética, mas também fortalece a sustentabilidade ambiental e impulsiona o desenvolvimento econômico local. Investir em tecnologias eficientes para aproveitar essa biomassa é essencial para a sustentabilidade ambiental.

Neste contexto, podemos citar alguns exemplos de biomassa da indústria florestal e/ou agroindústria que serão utilizadas na pesquisa.

O Quadro 3 e Quadro 4 apresentam as propriedades físico-química e composição dos principais componentes (extrativos, hemicelulose, celulose, lignina e cinzas) das biomassas em estudo por diversos autores na literatura. Sendo denominado como homocelulose, a soma dos componentes celulose e hemicelulose.

Quadro 3 - Composição química dos principais componentes de algumas biomassas *in natura* estudadas na literatura

Biomassa	Extrativos	Homo-celulose	Lignina	Cinzas totais	Autores
Casca de Arroz	5	52,6	26,2	16,8	(SALANTI <i>et al.</i> , 2010)
	6,1	54,8	37	10,6	(CARVAJAL <i>et al.</i> , 2016)
	10,4	61,4	38,5	11,1	(BORGES <i>et al.</i> , 2022)
Serragem de Eucalipto	7,9	54,3	31,3	0,6	(JESÚS RANGEL <i>et al.</i> , 2016)
	5,2	59,9	25,5	1,1	(TAVARES <i>et al.</i> , 2022)
	2,3	61,9	30,5	1	(STOFFEL <i>et al.</i> , 2017)
Bagaço de Sorgo Biomassa	13,1	59,2	24,7	3,4	(DOS SANTOS <i>et al.</i> , 2021)
	19,9	55	22,2	na	(DESHAVATH <i>et al.</i> , 2018)
	18	60,3	19,4	na	(JUNG <i>et al.</i> , 2015)

Fonte: Autoria própria

Quadro 4 - Propriedades físico-química das biomassas *in natura* estudadas na literatura

Propriedades	Casca de arroz		Serragem de eucalipto		Bagaço de Sorgo Biomassa
	(ZHANG, S. <i>et al.</i> , 2018)	(RAJASEKHAR REDDY; VINU, 2018)	(ARIAS <i>et al.</i> , 2008a)	(WANG <i>et al.</i> , 2019)	(YUE <i>et al.</i> , 2017)
<i>Análise imediata (%m)</i>					
Umidade (U)	na	na	6,5	6,2	7,8
Material volátil (MV)	73,5	60,2	84,0	84,5	79,4
Carbono fixo (CF)	14,7	16,3	na	15,1	17,0
Cinzas (Cz)	11,8	23,5	0,7	0,4	3,5
<i>Análise Elementar (%m - base umida)</i>					
Carbono (C)	40,8	45,1	49,0	46,2	43,1
Hidrogênio (H)	5,7	6,4	6,1	6,4	5,5
Oxigênio (O)*	40,5	48,1	44,6	46,9	49,9
Nitrogênio (N)	1,2	0,4	0,2	<0,1	1,4
<i>Poder Calorífico superior (MJ/kg)</i>	16,2	13,1	19,4	18,2	17,0

Nota: *obtida por diferença

Fonte: Autoria própria

2.2.1 Casca de arroz

O Brasil é um dos maiores produtores de arroz do mundo, com produção mundial de 10 milhões de toneladas, a produção de arroz no Brasil na safra 2023/2024 se encerra estimada em 298,41 milhões de toneladas (CONAB, 2024a).

A maior produção de arroz está situada na região sul do Brasil, no Rio Grande do Sul, onde em média se produz 7,1 milhões de toneladas do grão por safra. Dados da CONAB da última safra apontam que no estado de Santa Catarina foram coletados 1,178 milhão de toneladas, já Tocantins se destacou com 560,7 mil toneladas e Mato Grosso com 332,1 mil toneladas (CONAB, 2024b).

A casca de arroz é a principal matéria-prima de usinas de biomassa no Rio Grande do Sul, o potencial energético é de 175 MW por ano, sua principal utilização é para produção de energia, em fornalhas, secadoras e nas autoclaves das indústrias arrozeiras, onde as temperaturas de queima podem chegar até 1000 °C (LORENZETT *et al.*, 2012a).

A casca de arroz é um produto de origem vegetal, é composto por celulose 34,0-53,2%, hemicelulose 4,6-28,0% e lignina 16,0-24,0% (MARCONCINI JOSÉ MANOEL, 2007), sendo um revestimento fibroso e duro que mantém a umidade e protege o grão de arroz do vento e pragas. Ela possui dimensões em torno de 4 mm por 6 mm e baixa densidade aparente, consistindo em porcentagens de material volátil entre 55,60-73,50%, carbono fixo 14,70-22,21%, cinzas 11,40-23,50% e teor de umidade 5,56-10,30%. Ela é também composta de proteína (2,0-2,8%), gordura (0,3-0,8%), fibras (34,5-45,9%) e carboidratos (22,0- 34,0%) (LORENZETT *et al.*, 2012b).

O resíduo da cultura do arroz (casca) possui alto poder calorífico, sendo uma ótima matéria-prima para usinas de biomassa. Em pesquisa da literatura (CHUNGSANGUNSIT *et al.*, 2004) foi concluído que a cada tonelada de casca de arroz gaseificada é economizada 1 tonelada de emissões de gases CO₂ do efeito estufa, sendo que o estudo também aponta que as emissões de SO₂ e NO_x nas usinas são menores se comparados a geração de energia a carvão e óleo.

Alguns dos desafios do uso da casca de arroz, assim como em outras biomassas, é melhorar suas propriedades, uma vez que possui alta umidade, muitos minerais (cinzas) e baixo poder calorífico (VIEIRA *et al.*, 2020), sendo que a aplicação de pré-tratamentos, como a

torrefação, se faz necessário para melhorar a qualidade da casca de arroz como biocombustível.

Na literatura há diversos estudos de torrefação da casca de arroz, sendo que um dos estudos (CHEN, C. *et al.*, 2021) foi realizada a torrefação em temperaturas de 200; 250 e 300 °C por 30 min. Ao final, observou-se uma diferença nos resultados de análise imediata em relação à casca de arroz *in natura*, o teor de oxigênio foi reduzido rapidamente para 28,91% abaixo de 300 °C. Foi reduzido o teor de voláteis de 68,01% a 50,50% e aumentado os teores de carbono fixo (de 15,92% a 28,39%) e as cinzas (de 13,40% a 19,33%). Tais valores mostraram que a biomassa depois do processo de torrefação poderá ser mais bem aproveitada para fins energéticos.

2.2.2 Serragem de eucalipto

De acordo com a Indústria Brasileira de Árvores, no Brasil existem 7,6 milhões de hectares de eucalipto plantados, com uma produtividade média de 33,4 m³/ha/ano, a espécie mais plantada no Brasil é o *Eucalyptus grandis*. As áreas de plantio de eucalipto estão distribuídas em todo o território, sendo 54,2% na região Sudeste, 16,4% Nordeste, 12,2% Centro-oeste, 11,8% na região Sul e 5,5% no Norte (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2023).

O eucalipto é muito aproveitado devido seu rápido crescimento e capacidade de adaptação à diferentes regiões, seu uso ocorre de diversos modos, como carvão vegetal, nas indústrias de celulose e papel, como chapas de fibras e de partículas, na geração de energia e na construção civil (EMBRAPA, 2019). O plantio de eucalipto é amplamente utilizado no Brasil, ocupando cerca de 72% da área destinada a florestas plantadas no país, especialmente para fornecimento de biomassa lenhosa, classificada como fonte de energia renovável (EMBRAPA, 2022).

A biomassa lenhosa contém materiais de parede celular compostos de celulose (30-40%), hemiceluloses (25-35%) e lignina (12-30%), a hemiceluloses, os compostos mais reativos, decompõem-se a temperaturas na faixa de 225-325 °C, celulose em 305-375 °C e lignina gradualmente na faixa de temperatura de 250-325 °C (RAMBO *et al.*, 2015).

Em pesquisa anterior (RAMBO *et al.*, 2015) foi indicado que a serragem apresenta teor de cinza de 0,11±0,01 %, teor de umidade 10,10±0,08%, materiais voláteis de 83,88±0,10%, carbono fixo 16±0,10% e poder calorífico de 20,00±0,40%. No estudo, em comparação com outras biomassas, os autores afirmam que a serragem possui maior teor de lignina e maior poder calorífico, pois a lignina contém menos oxigênio do que os polissacarídeos presentes na

celulose e hemicelulose.

A biomassa de serragem quando submetida a processos de torrefação apresenta aumento de densidade energética, teor de carbono fixo, redução de umidade e matéria volátil, e maiores rendimentos de massa, resultando em biocarvão, um potencial substituto do carvão vegetal (MAGDZIARZ *et al.*, 2017).

Tais fatos também podem ser observados em outro estudo (SILVA *et al.*, 2020), em que foi realizada a torrefação de biomassa de serragem de eucalipto em temperaturas de 180; 220 e 260 °C com diferentes tempo de residência (20, 40 e 60 min). No caso, a torrefação aumentou a hidrofobicidade, 69% do teor de umidade original, prolongando a vida útil do armazenamento. Os teores de material volátil e carbono fixo foram maiores, enquanto as relações H/C e O/C tendem a valores mais baixos melhorando a qualidade da biomassa e o poder calorífico também aumentou 5,1% (de 18,62 para 19,58MJ.kg⁻¹).

2.2.3 Bagaço de sorgo biomassa

O sorgo biomassa é uma das principais culturas plantadas no Brasil, destinado para produção de energia devido a elevada produção de massa vegetal. A área plantada com sorgo no Brasil aumentou de 1.030.866 hectares em 2022 para 1.260.355 hectares em 2023, representando um crescimento de 22,3% (IBGE, 2023). Sua produtividade chegou a 2,8 milhões de toneladas na safra de 2021/2022 (CONAB, 2022).

O sorgo é uma das plantas que melhor satisfaz a demanda de produção de biocombustíveis, possui um processo fotossintético semelhante ao da cana-de-açúcar. Dentre suas qualidades está a sua fácil adaptação a climas tropicais e temperados, tolerância à estiagem e a capacidade de produzir abundantes biomassas lignocelulósicas (MAY ENG-AGRÔN *et al.*, 2015).

Conforme a variação do tipo de sorgo, isto é, o tipo de cultivo e a época da colheita, seus principais componentes estruturais, podem variar em porcentagem de 35 a 45% de celulose, 15 a 25% hemicelulose e 5 a 10% da lignina. O sorgo biomassa apresenta valores maiores de 50% de umidade, sendo que tal influência pode ser minimizada por meio de técnicas adequadas de cultivo, escolha da melhor época e método de colheita. As melhores épocas são de março a setembro onde os dias são mais curtos, pois o sorgo é sensível ao fotoperíodo e floresce apenas quando os dias possuem 12 h (ALMEIDA *et al.*, 2019; MAY ENG-AGRÔN *et al.*, 2015).

Há poucos estudos em relação à torrefação do bagaço do sorgo biomassa, sendo que em

um dos estudos encontrados na literatura (YUE *et al.*, 2017), os autores realizaram experimentos de torrefação no sorgo biomassa em condições de temperaturas de 250; 275 e 300 °C por 30 min. Na amostra torrada os valores de umidade diminuíram para 3,24%, o carbono fixo de 17,01% aumentou para 32,22%, o teor de voláteis de 69,39% diminuiu para 60,07% e o teor de cinzas aumentou para 6,04%. Por fim o valor de poder calorífico foi para 23,2 MJ kg⁻¹ considerando a temperatura de torrefação de 300 °C. Os autores concluíram que o pré-tratamento foi eficaz para que o sorgo tenha melhor rendimento quando utilizado para fins energéticos.

2.3 PROCESSO DE TORREFAÇÃO DA BIOMASSA

A biomassa é considerada uma promissora fonte de energia renovável, porém contém propriedades energéticas não muito vantajosas quando utilizada *in natura*. Isto ocorre devido à biomassa ser obtida por meio de plantas, madeiras, resíduos agrícolas e alimentos, nos quais possuem diferentes granulometria, alto teor de água e oxigênio na composição. Tais fatores diminuem a eficiência das etapas do processo de conversão em energia térmica e mecânica (PATEL *et al.*, 2016).

A torrefação tem por finalidade melhorar as propriedades físico-químicas da biomassa, aumentando seu poder calorífico, o teor de carbono, homogeneidade e resistência à degradação biológica, bem como redução das matérias voláteis. Por utilizar condições brandas, a torrefação apresenta maiores rendimentos de massa sólida e produtividade em comparação com a pirólise, onde são utilizadas temperaturas mais altas (DA SILVA *et al.*, 2018).

Pode-se dividir o processo de torrefação em algumas etapas, sendo que primeiramente ocorre o aquecimento inicial e a temperatura aumenta até o processo de secagem da biomassa, seguida pela pré-secagem, que ocorre acima de 100 °C, e a umidade começa a diminuir pela evaporação ou perda de água. Quando a temperatura é aumentada para 200 °C ocorre o processo de pós-secagem e toda a água é liberada, enquanto há uma transferência de calor para a massa das partículas de biomassa. O processo seguinte é a torrefação, no qual há uma maior perda da massa devido à queima que ocorre a 300 °C. O processo de resfriamento das partículas ocorre quando a temperatura fica menor que 200 °C até temperatura ambiente (VAN DER STELT *et al.*, 2011b).

A torrefação pode ser classificada em seca ou úmida (ONG *et al.*, 2021). Na torrefação à seco pode ocorrer em atmosfera não oxidativa, utilizando nitrogênio e dióxido de carbono como

gases principais ou em atmosferas oxidantes onde usa-se ar, gás de combustão e outros gases contendo diferentes concentrações de oxigênio (WANG *et al.*, 2013). Quando a biomassa é tratada com água e soluções ácidas diluídas entre 180 °C e 260 °C com tempo de residência de 5 a 240 min é classificada como torrefação úmida. Neste tipo de torrefação o processo de degradação ocorre na fase líquida e, devido à alta pressão, melhora-se o poder calorífico de combustíveis em temperaturas mais baixas do que a torrefação a seco (ONG *et al.*, 2021). Na torrefação a vapor utiliza-se vapor de alta temperatura e alta pressão para torrar a matéria-prima lignocelulósica em temperaturas entre 200 °C e 260 °C com tempo de reação de 5-10 min (BALAT *et al.*, 2008b).

Como todo processo térmico, a torrefação possui parâmetros que podem influenciar o resultado da biomassa torrada. Os fatores que mais relevantes são a temperatura, tempo de residência, vazão, composição do gás de arraste e tamanho da partícula (ONG *et al.*, 2021).

A temperatura é uma das condições que têm mais influência nos resultados, sendo a torrefação categorizada como leve entre temperaturas de 200 °C a 235 °C, em que parte das moléculas de baixo peso molecular e umidade evaporam afetam, primeiramente, a hemicelulose segundo (CHEN; KUO, 2011). De 235 °C a 275 °C ocorre uma torrefação média, em que a hemicelulose, praticamente, se decompõe completamente e a celulose começa a ser consumida. Acima de 275 °C e até 300 °C a torrefação é classificada como severa, em que a hemicelulose foi totalmente consumida e a grande parte de celulose foi degradada. A lignina é a estrutura mais difícil de ser degradada nessas temperaturas, apresentando baixa perda em torrefações severas (CHEN; KUO, 2011b).

O tempo de residência também é um fator importante podendo ter variações (ONG *et al.*, 2021), sendo que o poder calorífico do combustível sólido é aumentado pela torrefação e o tempo aumenta o teor de carbono na biomassa. Em relação ao tamanho de partículas, partículas menores promovem melhor transferência de calor, mantendo a temperatura constante no processo de torrefação (KAN *et al.*, 2016). A vazão do gás de arraste, de acordo com (BARSKOV *et al.*, 2019) (2019) não desempenhou nenhum papel importante nas condições internas de torrefação, já no estudo de (ASADULLAH *et al.*, 2014) (2014) o aumento da vazão de N₂ na torrefação da casca de palmiste ajudou na remoção dos produtos voláteis, mas não alterou o rendimento dos sólidos.

As principais aplicações da biomassa torrada são nos processos de combustão, pirólise e gaseificação (ONG *et al.*, 2021). Na combustão ocorre a queima do material sólido seco em caldeiras com alta temperatura na presença de oxigênio, produzindo vapores em alta pressão

que serão usados para mover turbinas de geradores elétricos. Na pirólise, ocorre a queima da biomassa sem a presença de oxigênio em diversas etapas, sendo elas, pré-secagem, secagem, volatilização, oxidação, fusão e cinzas, formando gás combustíveis e subprodutos com alta densidade e eficiência energética. No processo de gaseificação, caracterizado pela queima do combustível com quantidade de oxigênio abaixo da quantidade estequiométrica, se converte um insumo sólido em uma mistura de gases que pode ser queimada em turbinas a gás ou motores de combustão (ONG *et al.*, 2021).

Na literatura há vários estudos referentes à torrefação de biomassa e suas aplicações, podendo-se citar alguns deles na sequência.

Em estudo não tão recente (CHEN *et al.*, 2013) foi realizado a torrefação não oxidativa e oxidativa com temperaturas leve 220 °C, média 260 °C e severas 300 °C por 30 min na casca de arroz. Na torrefação não oxidativa, o teor de voláteis diminuiu de 65,32% para 41,26% em temperatura de 220 °C para 300 °C, o carbono fixo aumentou de 18,73% para 35,31% e o teor de cinzas de 15,95% para 23,43%. Para a torrefação oxidativa, as alterações de material volátil, carbono fixo e cinzas foram semelhantes às da torrefação não oxidativa. Para o experimento de torrefação a 300 °C, o teor de carbono fixo atingiu 37,23% em uma concentração de O₂ de 5%, enquanto o teor de voláteis atingiu um valor mínimo de 35,49% em uma concentração de O₂ de 10%. Foi concluído que as propriedades do combustível de casca de arroz foram mais sensíveis à temperatura de torrefação do que à concentração de O₂. Os rendimentos de massa e energia da casca de arroz torrada foram reduzidos mesmo com pequenas concentrações de O₂, em relação aos produtos líquidos e gasosos, o rendimento aumentou com a temperatura de torrefação e concentração de O₂.

Em outro estudo (MAGDZIARZ *et al.*, 2017), dois tipos de biomassa lenhosas foram submetidos ao processo de torrefação, utilizando-se 2 g de amostra em três diferentes temperaturas (230 °C; 260 °C e 290 °C), aplicando um tempo de residência de 1 h e vazão de 2,5 mL/min de argônio. Após a torrefação foram realizadas análises termogravimétricas. Os autores observaram que a torrefação aumentou o poder calorífico de 15,70 MJ/kg (amostra *in natura*) para 24,4 MJ/kg (amostra torrada). A conclusão foi que a torrefação melhorou as propriedades térmicas de ambas as amostras e que o efeito da temperatura foi maior do que o efeito do tempo de residência.

Em pesquisa posterior (ZENG *et al.*, 2019) foi analisado a viabilidade de produzir produtos de pirólise combinando com pré-tratamento da torrefação, utilizou-se talo de milho lavado com água, óleo e ácido acético 5% para realizar a torrefação em temperaturas de 230;

260 e 290 °C por 30 min. Os autores observaram que o rendimento dos produtos do talo de milho sólidos não lavados diminuíram de 96,02% para 49,58% à medida que a temperatura de torrefação aumentou. Em contrapartida, os produtos gasosos e líquidos aumentaram de 2,42% para 24,90% e de 1,56% para 25,52%, enquanto os produtos sólidos lavados tiveram um aumento de rendimento devido à remoção dos metais alcalinos terrosos que reduziram a temperatura de pirólise e facilitaram a liberação de compostos voláteis. Por fim, foi concluído que os pré-tratamento da lavagem e torrefação melhoraram as propriedades como combustível dos talos de milho devido à remoção de metais e aumento do teor de voláteis.

Em outra pesquisa (GONG *et al.*, 2019) os autores também combinaram a torrefação com outro pré-tratamento (lixiviação), utilizando resíduos de biomassa de frutas, casca de arroz e bagaços de cana-de-açúcar, para depois realizar a transformação da biomassa em *pellets*. Após a biomassa ser lixiviada foi submetida à torrefação úmida com temperatura de 200 °C por 5 min com taxa de aquecimento de 4 °C/min. Assim como no estudo anterior, os pré-tratamentos, em especial a torrefação, melhorou as propriedades do biocombustível e permitiu uma boa formação de *pellets*, uma vez que a densidade energética, poder calorífico e a hidrofobicidade das biomassas foram aprimoradas, os teores de carbono aumentaram em 9,91% nos resíduos de frutas, 6,23% na casca de arroz e 23,74% no bagaço de cana-de-açúcar.

Em pesquisa posterior com o uso de biomassa lenhosa como a madeira de Acácia nilótica (SINGH, S. *et al.*, 2020) foi realizada a torrefação em temperaturas de 220 a 280 °C e tempo de residência de 20 a 60 min, fazendo posterior a análise imediata e a da composição elementar da biomassa torrada e comparada com a biomassa *in natura*. No experimento os autores observaram que a temperatura na torrefação teve efeito mais pronunciado no rendimento de sólidos em comparação ao tempo residência, e as características de combustível foram melhoradas após torrefação. Foi observado um maior valor de poder calorífico quando a biomassa foi torrada a 280 °C por 40 min, a umidade da amostra após torrefação foi de 35,44% para 6,61%, indicando que a amostra ficou menos higroscópica.

2.4 INFLUÊNCIA DA TORREFAÇÃO NA ESTRUTURA DA BIOMASSA

A influência da torrefação na estrutura da biomassa depende dos parâmetros que serão utilizados e conforme a aplicação final do produto, porém de maneira geral o processo altera a distribuição dos componentes da biomassa (CANDELIER *et al.*, 2011a). Em uma torrefação típica até 300 °C a influência das reações químicas reduz o teor de hemicelulose, enquanto a

celulose se degrada lentamente e o teor de lignina aumenta (WANG *et al.*, 2017).

Quando temperaturas de torrefação atingem 200 °C inicia-se a degradação da hemicelulose ocorrendo reações de desacetilação e despolimerização, a fase amorfa da celulose também começa a se decompor, enquanto a fase cristalina se decompõe em temperaturas superiores a 270 °C (CANDELIER *et al.*, 2011b; COLLARD; BLIN, 2014; MELKIOR *et al.*, 2017).

A lignina possui uma estrutura maior em relação à hemicelulose e celulose, é constituída de um polímero tridimensional com 3 unidades básicas de p-hidroxifenil (H), guaiacil (G) e siringil (S), a deformação da lignina começa em 160-190 °C e a clivagem das cadeias laterais alifáticas e ligações ocorre em 300 °C com a remoção de grupos metóxila (ANCA-COUCÉ, 2016; COLLARD; BLIN, 2014; WANG *et al.*, 2017).

As mudanças estruturais nas cadeias químicas da estrutura da biomassa ocorrem de forma que as ligações C-C e C-H ficam mais frequentes após a torrefação, e devido a maior energia de tais ligações se comparado as ligações O-H e C-O nas biomassas não torradas, o valor calorífico é aumentado significante, fazendo com que a biomassa se assemelhe ao carvão (ONG *et al.*, 2021). A falta de ligações OH, após perda de umidade do material torrado, diminuem as ligações de hidrogênio entre as moléculas, deixando o produto mais hidrofóbico e estável a degradação biológica, facilitando também seu armazenamento (NIU *et al.*, 2019a).

Em relação à morfologia da biomassa, após torrefação fica porosa e mais quebradiça, devido à quebra das estruturas fibrosas da matriz hemicelulósica e despolimerização da celulose. A alta porosidade facilita a difusão de reagentes, melhorando as características de combustão e gaseificação, bem como a diminuição da fibra resulta numa maior mobilidade do material (NIU *et al.*, 2019b).

2.5 ASPECTOS ENERGÉTICOS DA TORREFAÇÃO

O processo de torrefação tem como objetivo aumentar o poder calorífico da biomassa, tornando-a mais eficiente para diversas aplicações. No entanto, a energia necessária para realizar esse processo é significativa, sendo influenciada pela temperatura, pelo tempo e pelas características da biomassa utilizada.

Estudos apontam que a torrefação consome menos energia em comparação com outras etapas do processamento da biomassa, e o ganho no poder calorífico pode compensar o

consumo energético durante o processo. Por exemplo, no estudo de (RIVERA *et al.*, 2020) os ganhos energéticos superaram os custos da torrefação de microalgas, já que essa etapa representou apenas 20% do consumo total de energia, enquanto a maior parte foi consumida no cultivo e na secagem. Em outro estudo, (RIVERA *et al.*, 2021)) observaram que a torrefação elevou o conteúdo energético da biomassa de microalgas, de 20,22 MJ/kg para 27,93 MJ/kg. Além disso, a torrefação apresentou a menor demanda energética entre todas as etapas de produção da biomassa torrificada, com os maiores consumos ocorrendo, novamente, nas fases de crescimento e secagem.

(SHAH *et al.*, 2012) analisaram os resultados da torrefação e concluíram que a energia externa líquida necessária para o processo aumentou com o teor de umidade da matéria-prima, enquanto a eficiência energética do sistema de torrefação diminuiu nas mesmas condições. No entanto, ambas as métricas de energia exibiram uma tendência de melhoria com o aumento das temperaturas do processo. Comparativamente, a torrefação apresentou uma eficiência energética significativa em relação a etapas como transporte e armazenamento.

Outros estudos também relataram a etapa de secagem como uma das que mais consomem energia no processamento da biomassa. (BRACHI *et al.*, 2016)) relataram que a energia necessária para secar cascas de tomate com teor de umidade de 80,5% foi de 2410 MJ/ton. De forma similar, (DODDAPANENI *et al.*, 2018) calcularam que reduzir a umidade da madeira de 40% para 10% exigiu 1372 MJ/ton.

(CARDONA *et al.*, 2019)), propuseram uma solução eficiente ao concluir que o uso dos próprios gases liberados no processo de torrefação para suprir energia reduziu o consumo total em 72%. Além de que a torrefação de resíduos de eucalipto resultou em um aumento de 29% na densidade energética em comparação à biomassa *in natura*.

Embora a torrefação envolva gastos energéticos, os estudos citados evidenciam que ela é mais eficiente em termos energéticos quando comparada a outras etapas como cultivo, secagem e transporte. Além disso, fatores como a otimização do processo e o uso de fontes de calor renováveis podem melhorar ainda mais sua viabilidade energética (RIVERA *et al.*, 2020b).

2.6 PESQUISAS DESENVOLVIDAS PELO GRUPO DE PESQUISA

O Laboratório de Combustão e Captura de Carbono (LC3) da Faculdade de Engenharia e

Ciências, Campus de Guaratinguetá (FEG-UNESP) é um centro de pesquisa dedicado ao estudo de tecnologias relacionadas à combustão, processos de captura de carbono e mitigação das emissões de gases de efeito estufa.

Na aplicação do uso de biomassa, o LC3 investiga técnicas avançadas de combustão visando reduzir as emissões de poluentes atmosféricos. Isso inclui o estudo de biocombustíveis e o desenvolvimento de sistemas de combustão mais eficientes e limpos. As biomassas avaliadas pelo grupo de pesquisa foram: bagaços de cana de açúcar, de sorgo sacarino e de sorgo biomassa e casca de arroz.

Considerando bagaços de cana de açúcar, de sorgo sacarino e de sorgo biomassa, foi aplicada a técnica de análise térmica para compreender o comportamento térmico de misturas de carvão e biomassa no processo combustão e oxicombustão. Parâmetros como índice de combustão, sinergismo e energia de ativação foram determinados. Os resultados indicaram similaridade no comportamento térmico entre os tipos de biomassa estudados. Observou-se um efeito sinérgico entre o carvão e a biomassa, resultando em melhorias no desempenho da combustão quando misturados. A substituição de N_2 por CO_2 melhorou a reatividade da combustão e a taxa de oxidação dos materiais. Em geral, os parâmetros de combustão foram melhorados na presença de oxigênio, devido às propriedades físico-químicas e características estruturais dos materiais. Embora o bagaço de cana-de-açúcar e suas misturas com carvão mostrem potencial para geração de energia limpa, os resultados indicaram que o bagaço de sorgo também é uma alternativa viável durante a entressafra da cana-de-açúcar (GALINA *et al.*, 2019).

Para a biomassa da casca de arroz foi utilizado a técnica de pirólise lenta em reator de leito fixo para avaliação do aproveitamento energético e estudo da influência dos parâmetros do processo. A fim de comparar o potencial da biomassa *in natura* e após o processo termoquímico foi realizada diversas análises como, poder calorífico, microscopia eletrônica de varredura, análise imediata e elementar, espectroscopia de infravermelho e avaliação da eficiência energética. Ao aplicar o planejamento experimental de Taguchi variando a taxa de aquecimento, temperatura, tempo de residência e massa da biomassa obteve-se as condições de melhor ajuste para otimização da pirólise, considerando as variáveis rendimento de biochar, carbono fixo e poder calorífico superior. Com a análise da variância pela ANOVA, a temperatura foi o parâmetro de maior influência dentre as condições utilizadas. A avaliação energética foi positiva uma vez que a energia contida no biochar e no bio-óleo foi maior que a energia usada no processo de pirólise (VIEIRA *et al.*, 2020).

O estudo dos principais componentes da biomassa por curvas TG/DTG fornecem o percentual de cada componente de maneira mais prática e mais acessível em relação aos métodos convencionais. Sendo assim foi proposto a elaboração de uma metodologia para determinar os teores de hemicelulose, celulose e lignina da palha e bagaço de cana-de-açúcar por meio de análise termogravimétrica. Cada componente da biomassa após separação por tratamento químico foi submetido a análise termogravimétrica em atmosfera inerte e oxidante para investigação do efeito de interação entre os componentes isolados e suas misturas. Os componentes puros apresentaram efeito sinérgico entre si, a comparação das curvas DTG teórica e experimental permitiu detalhar diferenças nos perfis de decomposição, sendo que o efeito sinérgico entre as amostras foi mais pronunciado nas curvas DTG em atmosfera oxidante. A hemicelulose permitiu reduzir a taxa de decomposição da celulose, apesar da fraca interação entre elas. A mistura de hemicelulose e lignina apresentou efeito sinérgico sobre a lignina, promovendo aumento na taxa de decomposição da hemicelulose. A lignina teve efeito positivo na decomposição da celulose em atmosfera oxidante, inibindo a sua decomposição, já a celulose proporcionou aumento na taxa de decomposição da lignina no último evento (RICCIULLI *et al.*, 2024).

2.7 AVALIAÇÃO DA LITERATURA CONSULTADA

Ao realizar uma revisão na literatura, obteve-se informações complementares sobre a torrefação de biomassa, que auxiliaram no planejamento para execução dos experimentos do projeto. O resumo das informações estão no Quadro 5.

Quadro 5 - Resumo da literatura sobre torrefação

(continua)

Autores	Biomassa	Tipo e nível de torrefação	Condições experimentais	Análises de caracterização realizadas	Planejamentos experimentais realizados
(BURATTI <i>et al.</i> , 2017)	Borras de café	Não-oxidativa Atmosfera de N ₂ / suave, média, severa	Torrefação por análise termogravimétrica / Amostra de 0,3 g / 220;260;300 °C / 20;40;60 min	Análise elementar / Poder calorífico	Metodologia superfície de resposta (DCC) / Design Box-Behnken
(ZHANG; SONG, 2018)	Madeira de choupo	Não-oxidativa Atmosfera de N ₂ / suave, média, severa	Torrefação seca em reator tubular horizontal e sistema semifechado / Amostras de 1,5 g entre 0,83 – 0,38 mm / 200; 240; 280 e 320 °C / 15, 30, 60 e 120 min	Análise imediata / Análise elementar / Poder calorífico / Análise termogravimétrica / FTIR / Análise moabilidade e hidrofobicidade	na
(ZHANG, C. <i>et al.</i> , 2018)	Borra de café / Resíduo de medicina chinesa / Resíduo de microalga	Não-oxidativa Atmosfera de N ₂ / suave, média, severa	Torrefação em cilindro de aço / Temperatura de 200 -300 ° C por 15 - 60 min / Amostras de 8 g menores que 0,4 mm	Análise imediata / Análise elementar / Poder calorífico / Análise energética	na
(WANG <i>et al.</i> , 2019)	Serragem	Não-oxidativa Atmosfera de N ₂ / média, severa	Torrefação em reator de leito de jato retangular / Amostras com 0,5 – 1,0 mm / 240–300 °C / 50 - 120 min	Análise imediata / Análise elementar / Poder calorífico / Análise termogravimétrica	na
(BABINSZKI <i>et al.</i> , 2020)	Samambaia (Azolla filiculoides)	Oxidativa / severa	Torrefação seca em termobalança / Amostra de 8-10 mg / 260–300 °C / 15 min,	Cromatografia gasosa / Espectrometria de massa / Análise térmica / Microscopia eletrônica de varredura / Análise imediata	na
(MANATUR A, 2020)	Bagaço de cana-de-açúcar	Não-oxidativa Atmosfera de N ₂ / suave, média, severa	Torrefação seca em reator de aço inoxidável / Amostra de 200g com 50 mm / 200, 225, 250 e 275 °C / 15, 30, 45 e 60 min	Análise imediata / Análise elementar / Composição de lignocelulose / Poder calorífico / FTIR / Análise termogravimétrica	na

(conclusão)

Autores	Biomassa	Tipo e nível de torrefação	Condições experimentais	Análises de caracterização realizadas	Planejamentos experimentais realizados
(HU <i>et al.</i> , 2020a)	Resíduos florestais de bambu	Não-oxidativa Atmosfera de N ₂ / suave, média, severa	Torrefação seca em forno elétrica tubular /Amostra com 3g/200–300 °C /,60 min,10 °C min ⁻¹	Análise imediata / Análise elementar /Poder calorífico /Análise termogravimétrica	na
(TIAN <i>et al.</i> , 2020)	Sabugos de milho	Não-oxidativa Atmosfera de N ₂ / suave, média, severa	Torrefação seca em forno elétrica tubular /Amostra com 15g / 210-300 °C / 30 min, 15 °C min ⁻¹	Análise imediata /Análise elementar /Poder calorífico /Análise cinética /Análise termogravimétrica /Análise da cristalinidade / FTIR	na
(YAN <i>et al.</i> , 2021)	Resíduo de ervas	Não-oxidativa Atmosfera de N ₂ / suave, média, severa	Torrefação por micro-ondas/ 200-300 °C e 200–1000 W/ Amostra com 25 g / 5-20 min	Análise termogravimétrica / FTIR	Metodologia superfície de resposta (DCC)
(ARPIA <i>et al.</i> , 2021)	Bagaço de cana-de-açúcar	Não-oxidativa Atmosfera de N ₂ / suave, média	Torrefação úmida por micro-ondas / Amostra 10 g / 20 a 30 min / 200-257 °C 400 e 560 W	Análise imediata /Análise elementar /Poder calorífico /Análise termogravimétrica /Análise da cristalinidade / FTIR/ GC-MS	Projeto experimental Taguchi

Fonte: Autoria própria

3 MATERIAIS E MÉTODOS

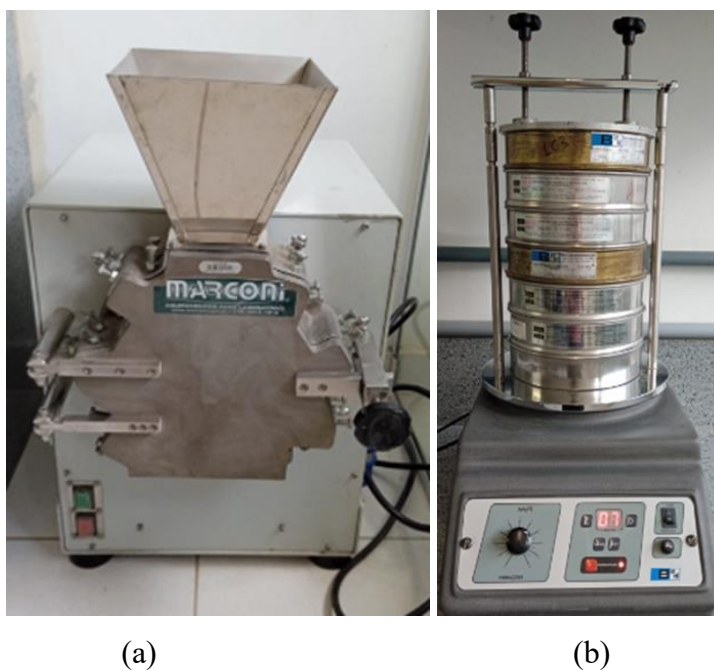
3.1 MATÉRIA PRIMA E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Neste estudo são utilizadas três biomassas lignocelulósicas: casca de arroz, serragem de eucalipto e bagaço de sorgo biomassa.

A casca de arroz foi fornecida por produtores de arroz de Guaratinguetá, localizada na região do Vale do Rio Paraíba do sul, no estado de São Paulo. A serragem de eucalipto proveniente das plantações de eucalipto da cidade de Itapeva, no estado de São Paulo. O bagaço do sorgo biomassa foi fornecido pela EMBRAPA Milho e Sorgo, localizada na idade de Sete Lagoas, no estado de Minas Gerais.

Na preparação e seleção de tamanho de partículas, foram utilizados os equipamentos apresentados na Figura 4.

Figura 4- Equipamentos utilizados na preparação das biomassas: (a) moinho de facas e (b) agitador de peneiras



Fonte: Autoria própria

As biomassas são previamente moídas em moinho de facas modelo MA 1680 da marca Marconi (Figura 4a), passando por uma peneira de 850 mm para redução do tamanho e promover a homogeneidade do material. Após processo de moagem, as amostras de biomassa

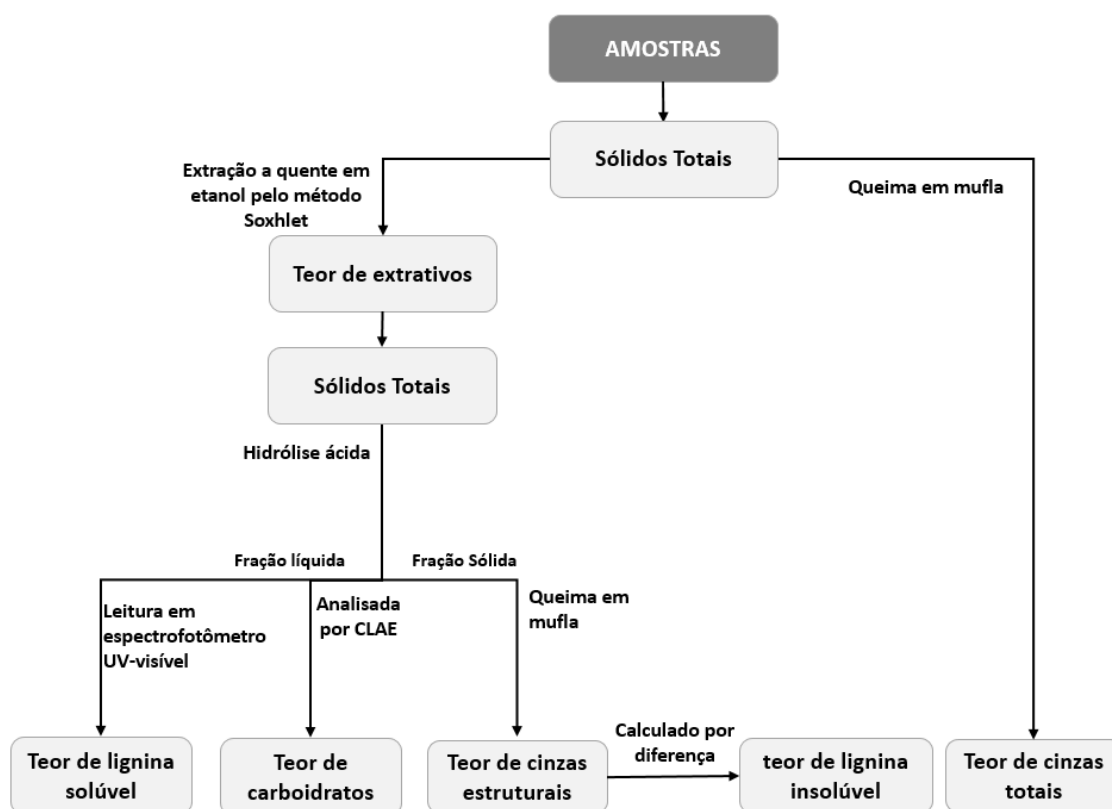
são secas por 4 h em temperatura de 105 °C com a finalidade de não aglomerar na etapa de peneiramento. Realiza-se o peneiramento das amostras com o agitador de peneiras marca BERTEL e utiliza-se um conjunto de peneiras da norma ABROZINOX com malhas entre 75 e 600 mm da série ASTM (Figura 4b). A análise é baseada na norma NBR 7217-1987. Os equipamentos utilizados estão disponíveis no Laboratório de Combustão de Captura de Carbono (LC3).

Para facilitar na apresentação dos resultados, as amostras de biomassa serão identificadas com as siglas CA, SE e SB que representam, respectivamente as biomassas de casca de arroz, serragem de eucalipto e bagaço de sorgo biomassa.

3.2 DETERMINAÇÃO DOS CONSTITUINTES DAS BIOMASSA

As etapas do procedimento utilizado na determinação da composição química das biomassas estudadas estão ilustradas na Figura 5.

Figura 5 - Fluxograma simplificado da metodologia utilizada para determinar a composição química da biomassa lavada e amostras obtidas no tratamento químico



Para uso energético, determinar os teores de hemicelulose, celulose e lignina em uma biomassa lignocelulósica é importante para avaliar seu potencial energético, uma vez que quanto maior os teores de celulose e hemicelulose, maior será o potencial da biomassa para a produção de bioenergia. Conhecer os principais componentes de uma biomassa, possibilita avaliar a sua viabilidade econômica.

Nota-se que uma variedade de análises e equipamentos distintos são empregados no procedimento experimental. Ao término deste, os teores de cada componente das amostras foram determinados.

Na determinação da composição química da biomassa *in natura* (lignina, hemicelulose, celulose, extrativos e cinzas) é aplicado o método convencional por via úmida. Esses ensaios são feitos no Laboratório de Caracterização de Biomassa (FEG/UNESP), sendo executados em duplicata.

Todos os procedimentos descritos a seguir foram realizados com base na metodologia descrita pelo Laboratório de Energias Renováveis Norte-americano NREL (SLUITER *et al.*, 2008). O procedimento experimental será detalhado na sequência.

3.2.1 Determinação dos sólidos totais

O teor de sólidos totais (%ST) é determinado em balança semi-analítica com infravermelho, da marca Marte ID 50, disponível no LC3. Utiliza-se 1,00 g de amostra em temperatura de 105 °C por 30 min. O %ST é usado para a quantificação da massa seca da biomassa (MS), calculado pela equação (1), sendo *m* é a massa inicial da amostra. O valor de MS é utilizado nos cálculos da determinação de extrativos, carboidratos e lignina.

$$MS = \frac{m \cdot \%ST}{100} \quad (1)$$

3.2.2 Determinação do teor de extrativos

É utilizado o método de extração Soxhlet para determinação do teor de extrativos das amostras *in natura*. Em um cartucho de papel de filtro pesa-se 2 g de amostra e coloca-se dentro de um balão limpo e seco de 250 mL, que é acoplado ao extrator Soxhlet (Figura 6). Na extração do sorgo biomassa e casca de arroz utiliza-se etanol 95% (v/v); para a serragem é utilizado acetona PA. Após 24 h, o cartucho é seco em estufa a (105± 5) °C e o solvente contido no balão

é recuperado. Após a recuperação, o balão é seco em estufa (105 ± 5) °C e resfriado em um dessecador antes da pesagem. O percentual de extrativos (%E) é determinado pela equação (2), sendo MB_i massa do balão seco e MB_f massa do balão com extrativos.

$$\%E = \frac{MB_f - MB_i}{MS} \cdot 100 \quad (2)$$

Figura 6 - Conjunto de extração via processo Soxhlet



Fonte: Autoria própria

3.2.3 Determinação do teor de carboidratos e lignina

Na etapa de hidrólise ácida pesa-se cerca de 0,3 g da amostra sem extrativos em tubo de ensaio. Adiciona-se 3 mL de H_2SO_4 72% (m/m), mantendo-se em banho maria a 30 °C por 1 h, fazendo a agitação a cada 5 min com o auxílio de um bastão de vidro. A mistura é transferida quantitativamente para um erlenmeyer de 125 mL, com a adição de 84 mL de água deionizada, diluindo o ácido a 4%. O erlenmeyer é coberto com papel alumínio e autoclavado por 1 h na temperatura de 121 °C para a completa hidrólise dos oligômeros. A mistura é filtrada em um cadinho tipo *gooch* e placa com porosidade 3. A fração líquida é armazenada para determinação do teor de carboidratos e lignina solúvel. A fração sólida é lavada até a neutralidade com água deionizada e seca a 105 °C por 12 h no próprio filtro e depois pesada para a determinação do teor de lignina insolúvel.

3.2.3.1 Determinação dos teores de cinzas estruturais e de lignina insolúvel

A fração sólida obtida no subitem 3.2.3 é transferida para um cadinho de porcelana, seco e tarado. O cadinho é colocado na mufla pré-aquecida a 105 °C, mantendo-se por 12 min em aquecimento na razão de aquecimento 10 °C/min até temperatura chegar a 250 °C, aplicando-se uma isoterma de 30 min. A temperatura é novamente elevada na razão de aquecimento de 20 °C/min até 575 °C, aplicando-se uma isoterma de 3 h. Aguarda-se a mufla entrar em equilíbrio com o ambiente, retira-se o cadinho e procede-se a pesagem.

O percentual de lignina insolúvel (%LI) é determinado de acordo com a equação (3), sendo, LI o percentual de lignina insolúvel, M_{R2} a massa do filtro de vidro com resíduo insolúvel, M_{R1} a massa do filtro de vidro, M_{C2} a massa do cadinho com cinzas e M_{C1} a massa do cadinho, determinada pela equação (7).

$$\%LI = \frac{(M_{R2} - M_{R1}) - (M_{C2} - M_{C1})}{MS} \cdot 100 \quad (3)$$

3.2.3.2 Determinação do teor de lignina solúvel

Para essa etapa utiliza-se um espectrofotômetro de UV-visível da marca Shimadzu (modelo UV-1280), apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Espectrofotômetro de UV-visível utilizado para a determinação do teor de lignina solúvel



Fonte: Autoria própria

Na análise é utilizado o comprimento de onda de 240 nm para medir a absorbância das amostras de casca de arroz, sorgo biomassa e serragem e água deionizada como branco. Utiliza-

se uma alíquota de 2 mL da fração líquida obtida no subitem 3.2.3 e diluiu em balão de 10 mL de modo que a leitura da absorbância fique na faixa entre 0,7 e 1,0 nm.

A concentração de lignina solúvel (%LS) é calculada a partir da equação (4), sendo UV_{abs} o valor de absorbância medido; V_f o volume do filtrado (86,73 mL); FD o fator de diluição usado; ε a absorvidade (25 L/g.cm) e CO o caminho ótico (1 cm). O teor total de lignina (%LIG) é determinado pela equação (5).

$$\%LS = \frac{UV_{abs} \cdot V_f \cdot FD}{MS \cdot \varepsilon \cdot CO} \cdot 100 \quad (4)$$

$$\%LIG = \%LS + \%LI \quad (5)$$

3.2.3.3 Determinação de carboidratos

Parte da amostra analisados no subitem 3.2.3.2 foram reservados para a determinação de carboidratos. Utiliza-se o cromatógrafo líquido e uma coluna Aminex HPX 87H (300 x 7,8 mm, BioRad), com o detector de índice de refração Shimadzu RID-6^a (Figura 8, para a determinação das concentrações de celulose (glicose e celobiose) e hemicelulose (arabinose, xilose e ácido acético).

Figura 8 - Cromatógrafo líquido e seus módulos



Fonte: Autoria própria

Como fase móvel é preparada uma solução de H_2SO_4 0,005 M, é utilizado um fluxo de 0,6 ml/min, temperatura de determinação da absorbância foi de 45 °C e volume de injeção de 20 μL . O teor de acetato (%Ac) é calculado pela equação (6), sendo C_a a concentração do ácido acético obtido em mg/mL e C_{f-ac} o fator de conversão do ácido acético para acetato na biomassa (0,983).

$$\%Ac = \frac{C_a \cdot V_f \cdot C_{f-ac}}{MS} \cdot 100 \quad (6)$$

O teor de hemicelulose (%Hem) é calculado pela equação (7), sendo C_x a concentração de xilose e C_{ar} a concentração de arabinose em mg/mL e C_{f-h} o fator de conversão da hemicelulose (0,88).

$$\%Hem = \left[\frac{(C_x + C_{ar}) \cdot C_{f-h} \cdot V_f \cdot \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}}}{MS} \cdot 100 \right] + \%Ac \quad (7)$$

O teor de celulose (%Cel) é calculado pela equação (8), sendo C_c a concentração de celobiose e C_g a concentração de glucose em mg/mL e C_{f-c} o fator de conversão da celulose (0,9).

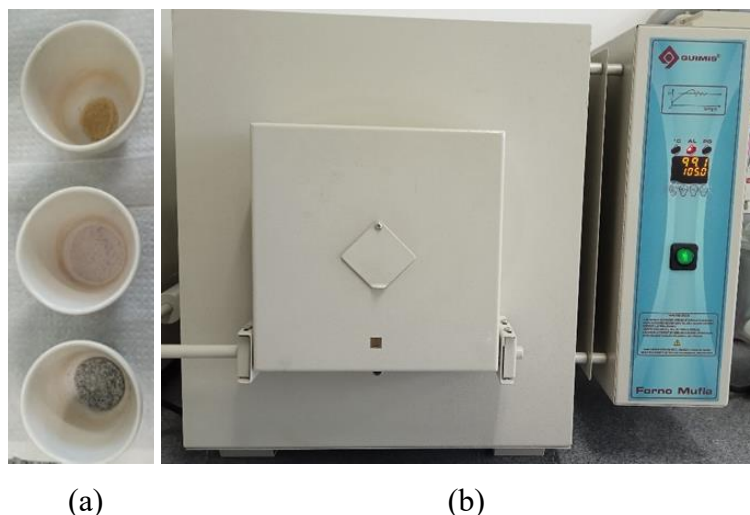
$$\%Cel = \left[\frac{(C_c + C_g) \cdot C_{f-c} \cdot V_f \cdot \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}}}{MS} \cdot 100 \right] \quad (8)$$

3.2.4 Determinação do teor de cinzas totais

As amostras são calcinadas em mufla marca Quimis (Modelo Q318S24) (Figura 9a) utilizando um cadinho de porcelana (Figura 9b). O cadinho é aquecido na mufla até a 105 °C, aplicando-se uma isoterma de 12 min. Em seguida a temperatura é elevada até 250 °C na razão de aquecimento de 10 °C/min e aplicando-se uma isoterma de 30 min. A temperatura é novamente elevada até 575 °C, na razão de aquecimento de 20 °C/min e aplicando-se uma isoterma de 3 h. O cadinho é removido da mufla quando a temperatura entrar em equilíbrio com o ambiente e transferido para um dessecador. O teor de cinzas totais (%CT) é determinado pela diferença entre o resíduo sólido após a queima e a massa de cinzas inicial, de acordo com a equação (9), sendo M_{C2} a massa do cadinho com cinzas e M_{C1} a massa do cadinho.

$$\%CT = \frac{M_{C2} - M_{C1}}{MS} \quad (9)$$

Figura 9 - Cadinho com cinzas totais (a) e mufla (b)



Fonte: Autoria própria

3.3 CARACTERIZAÇÕES FÍSICO-QUÍMICAS DAS BIOMASSAS

Diferentes técnicas foram aplicadas para a caracterização das biomassas estudadas, na forma *in natura* e torrificadas, visando, principalmente, a avaliação do potencial de determinados materiais serem aplicados como biocombustíveis é necessário determinar suas propriedades físicas, químicas e energéticas.

Nessa subseção é indicada as principais técnicas aplicadas para avaliar o potencial das biomassas estudadas para uso energético, bem como outras técnicas complementares.

3.3.1 Análise termogravimétrica

De acordo com o ICTAC², a análise térmica refere-se ao estudo da relação entre uma propriedade da amostra em função da temperatura, durante o seu aquecimento ou resfriamento de forma contratada. Dentre as técnicas de análise térmica, está a análise termogravimétrica (TGA), na qual a variação de massa é medida em função do aumento da temperatura, fornecendo informações sobre a decomposição térmica.

² International Confederation for Thermal Analysis and Calorimetry

Na área de energia, a TGA é essencial para investigar as propriedades térmicas de matérias primas a fim de compreender como as mudanças de temperatura afetam suas propriedades físicas e químicas. Elas são amplamente utilizadas para investigar os processos de conversão termoquímicas, tais como torrefação, pirólise, combustão e gaseificação.

Foi utilizado um sistema simultâneo da TA Instruments - SDT-Q600 (TGA-DTA-DSC) (Figura 10), disponível no LC3 e cadinho de alumina por suportar altas temperaturas e não influenciar na reação de decomposição de materiais. Esse equipamento permite ensaios de análise termogravimétrica (TGA), análise térmica diferencial (DTA) e calorimetria exploratória de varredura (DSC).

Figura 10 - Sistema de Análise Térmica Simultâneo (TGA-DTA-DSC) -



Fonte: Autoria própria

3.3.2 Análise imediata

Na análise imediata é determinado o teor de umidade, materiais voláteis, carbono fixo e cinzas das biomassas. Nessa pesquisa, a análise imediata foi determinada pela técnica TGA, seguindo-se o procedimento desenvolvido por (KARATEPE; KÜÇÜKBAYRAK, 1993). Os testes são realizados em duplicatas com massa de $(5 \pm 0,5)$ mg, em atmosferas inerte de nitrogênio (N_2), oxidante de ar sintético ($80\% N_2 + 20\% O_2$), vazão volumétrica de 100 mL/min. Primeiramente faz-se a análise do teor de umidade, utilizando-se atmosfera de N_2 , a vazão de 40 mL/min, com razão de aquecimento de $20\text{ }^\circ\text{C/min}$, de $30\text{ }^\circ\text{C}$ até $110\text{ }^\circ\text{C}$, mantendo-se temperatura de $110\text{ }^\circ\text{C}$ por 30 min. Na sequência, aumenta-se a razão de aquecimento para $40\text{ }^\circ\text{C/min}$ e elevou-se a temperatura até $950\text{ }^\circ\text{C}$ mantendo-se uma isoterma por 7 min para

quantificação do material volátil. Por último, aplica-se uma razão de resfriamento de 20 °C/min até temperatura de 750 °C, trocando-se para atmosfera de ar sintético, mantendo-se uma isoterma de 30 min, para ocorrer oxidação do carbono fixo e determinação do teor de cinzas.

3.3.3 Análise elementar

Essa análise foi realizada pela Central Analítica da Universidade de São Paulo/SP, utilizando um Analisador elementar - Perkin Elmer 2400 series II.

A análise elementar é aplicada na determinação da composição elementar das biomassas (%massa), incluindo carbono (C), hidrogênio (H) e nitrogênio (N), sendo essencial para prever o comportamento da combustão. Ressalta-se que no valor do %H obtido inclui o hidrogênio associado à umidade da amostra, tornando necessário calcular a fração de hidrogênio proveniente da água determinada na análise imediata.

O percentual de oxigênio (O) é calculado por diferença entre os demais elementos, subtraindo também a umidade (U) e as cinzas (Cz) obtidas pela análise imediata, conforme Equação (10).

$$O(\%massa) = 100 - \%(C + H + N + U + Cz) \quad (10)$$

3.3.4 Poder calorífico superior

O PCS das amostras de biomassas foi determinado experimentalmente em duplicata utilizando a bomba calorimétrica modelo IKA C2000 disponível no LC3 (Figura 11). O procedimento de análise é executado em conformidade com a norma ASTM E711-87.

Figura 11 - Bomba calorimétrica



Fonte: Autoria própria

O poder calorífico superior (PCS) indica a energia total liberada durante a combustão, incluindo o calor latente da condensação do vapor de água.

Quando a determinação do PCS em bomba calorimétrica é obtida considerando o percentual de umidade na amostra, o valor é indicado “como determinado”, sendo utilizada Equação (11) para determinar o PCS em base seca (PCS_{bs}), sendo U o percentual de umidade na amostra obtido pela análise imediata (CONAG *et al.*, 2018).

$$\text{PCS}_{\text{bs}}(\text{MJ/kg}) = \text{PCS} \cdot \left(\frac{1}{100 - U} \right) \cdot 100 \quad (11)$$

A conversão do PCS_{bs} para o poder calorífico inferior em base seca (PCI_{bs}) foi obtida conforme a Equação (12). O PCI representa a quantidade de energia efetivamente disponível durante a combustão, desconsiderando o calor associado à condensação do vapor de água formado. Essa é uma medida mais representativa da energia utilizável em processos práticos de conversão energética, sendo H a fração mássica (%massa) de hidrogênio presente na amostra em base seca obtida pela análise elementar (BRACHI *et al.*, 2019a).

$$\text{PCI}_{\text{bs}}(\text{MJ/kg}) = \text{PCS}_{\text{bs}} - 2,442 \cdot \left(8,936 \cdot \frac{H}{100} \right) \quad (12)$$

A constante 2,442 correspondente à diferença de entalpia (MJ/kg) entre a fase de vapor e a fase líquida da água a 25 °C e a constante 8,936 representa a razão entre a massa molar da água (H₂O) e a do hidrogênio molecular (H₂) (BRACHI *et al.*, 2019b).

3.3.5 Espectroscopia de infravermelho com transformada de fourier (FTIR)

Nessa técnica são identificados os grupos funcionais e ligações químicas das amostras investigadas. As análises são realizadas em um analisador Perkin Elmer Spectrum 100 FTIR/ATR disponível no Laboratório de Plasma do Departamento de Física (FEG/UNESP). A radiação infravermelha emitida sobre a amostra pode ser transmitida ou absorvida pela amostra. O espectro que resulta dessa transmissão e absorção molecular cria um padrão que permite identificar quais os grupos funcionais presentes na amostra. Os espectros foram determinados entre 600 e 4000 cm⁻¹, com 12 varreduras e resolução de 4 cm⁻¹.

3.3.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Essa técnica é indicada na análise da morfologia e composição superficial das amostras

de estudadas, sendo considerada uma avaliação complementar para essa pesquisa. A caracterização morfológica das amostras foi realizada em microscópio eletrônico de varredura (MEV) da Zeiss EVO LS-15 com sistema EDS/EBDS Oxford INCA Energy 250, disponível no Laboratório de Análise de Imagens de Materiais (LAIMat), no Departamento de Materiais da FEG-UNESP.

3.4 ÍNDICE COMBUSTÃO DAS BIOMASSAS

Para o cálculo das propriedades de combustão das biomassas, denominado também por índice de combustão, é necessário realizar as análises imediatas e de poder calorífico superior. As propriedades de combustão das biomassas são dadas pelo índice de proporção para combustível (FR), índice de combustibilidade (IC) e inflamabilidade volátil (IV), que foram determinados usando as equações (13), (14) e (15), respectivamente, descrito por (CONAG *et al.*, 2017b).

$$FR = \frac{CF}{MV} \quad (13)$$

$$IC = \frac{PCS}{FR} \cdot (115 - Cz) \cdot \frac{1}{105} \quad (14)$$

$$IV = \frac{PCS - 0,338 \cdot CF}{MV + U} \cdot 100 \quad (15)$$

sendo CF o carbono fixo; MV o material volátil; PCS o poder calorífico superior; Cz são as cinzas e U a umidade.

3.5 PROCEDIMENTO DE TORREFAÇÃO DAS BIOMASSAS

Para os testes de torrefação das biomassas é utilizado o reator tubular vertical (RTV) da marca FORTLAB, modelo FT-1200/I2 disponível no LC3 (Figura 12). O sistema possui um elevador para a colocação e retirada da amostra do reator, que possibilita a retirada da amostra de forma imediata e no tempo desejado.

Figura 12 - Reator tubular vertical



Fonte: Autoria própria

Para o controle e aquisição de dados, utilizou-se o software Flexlab que possibilita realizar a programação de temperatura, taxa de aquecimento e tempo de isoterma a partir de medições por dois termopares internos.

Na montagem da bancada experimental do RVT, utilizaram-se também medidores/controladores de fluxo mássico da Aalborg e o dispositivo USB-6501 da *National Instruments Corp.* O programa “Controle dos Aalborg’s” foi elaborado em LabView para o controle de vazão dos Aalborg’s.

As amostras foram colocadas em um cadinho de alumina com dimensões de 50 mm x 10 mm e inseridas no RTV. Aplicou-se uma taxa de aquecimento de 10 °C/min desde a temperatura ambiente até a temperatura de ensaios, sob uma atmosfera inerte de N₂ com vazão volumétrica de 100 mL/min.

3.5.1 Eficiência da torrefação

Para avaliar a eficiência do processo de torrefação, calculou-se o rendimento mássico (RM), equação (16), rendimento energético (RE), equação (17), e densidade energética (DE), equação (18), descrito por (CHEN *et al.*, 2013; LEE *et al.*, 2012a).

$$RM(\%) = \frac{M_t}{M_{in}} \cdot 100 \quad (16)$$

$$RE(\%) = RM \cdot \frac{PCS_t}{PCS_{in}} \quad (17)$$

$$DE(\%) = \frac{RE}{RM} \cdot 100 \quad (18)$$

sendo M a massa e PCS o poder calorífico superior. Os índices t e in, referem-se à biomassa torreficada e *in natura*, respectivamente.

3.6 PLANEJAMENTOS EXPERIMENTAIS

3.6.1 Método de Taguchi

Para os ensaios de torrefação das biomassas, utiliza-se o planejamento de experimentos desenvolvido por Genichi Taguchi, a fim de investigar o desempenho de parâmetros que afetam o processo de torrefação e seu comportamento interativo.

Denomina-se como fatores ou parâmetros de projeto as variáveis controláveis. As variáveis de saída, ou seja, os resultados obtidos chamadas de respostas. No estudo é identificado a significância, ou não, das variáveis de controle sobre as respostas obtidas na torrefação.

É realizado o Arranjo Ortogonal L9 proposto por Taguchi totalizando 9 experimentos, a partir de 4 fatores (A, B, C, D) para 3 níveis (Baixo, Médio e Alto) que influenciam no processo estudado a serem definidos nesta pesquisa, conforme apresentados na Tabela 1.

As combinações entre os fatores segundo o método de Taguchi são apresentadas na Tabela 2 (BARROS NETO *et al.*, 2016a).

Procede-se cada um dos experimentos definidos na matriz de Taguchi e obtém-se as variáveis resposta (Y_{ij}) de interesse. Todos os 9 experimentos são realizados em duplicata.

Para cálculo do efeito dos fatores sobre a variável resposta é utilizada a equação (19), sendo $M_{j,k}$ a média das variáveis resposta, Y_i variável resposta, J o fator (A, B, C, D), k o nível do fator (1, 2, 3) e n o número de repetições do nível k no fator j (BARROS NETO *et al.*,

2016b).

$$M_{j,k} = \frac{\sum Y_i}{n} \quad (19)$$

Tabela 1 - Valores dos fatores e níveis

Fatores	Níveis		
	Baixo (1)	Médio (2)	Alto (3)
A	1	2	3
B	1	2	3
C	1	2	3
D	1	2	3

Fonte: Autoria própria

Tabela 2 - Matriz ortogonal Taguchi L9

Experimentos	Fatores Codificados				Variável resposta
	A	B	C	D	
1	1	1	1	1	Y _{i1}
2	1	2	2	2	Y _{i2}
3	1	3	3	3	Y _{i3}
4	2	1	2	3	Y _{i4}
5	2	2	3	1	Y _{i5}
6	2	3	1	2	Y _{i6}
7	3	1	3	2	Y _{i7}
8	3	2	1	3	Y _{i8}
9	3	3	2	1	Y _{i9}

Fonte: Autoria própria

Pelo método de Taguchi os fatores controlados são denominados de parâmetros e os fatores não controlados de ruídos. Os ruídos representam variações indesejadas causadas por fatores externos ou não controláveis, como por exemplo mudanças ambientais. O objetivo da análise do sinal/ruído é identificar configurações que maximizem a robustez do sistema, reduzindo a variabilidade do processo para que funcionem sob diferentes condições operacionais. (BARROS NETO *et al.*, 2016b).

Para este estudo, considera-se a condição “maior é melhor”, equação (20), na análise da influência dos fatores sobre a razão sinal/ruído (S/N) sendo y a resposta de saída e n o número

de réplicas (BARROS NETO *et al.*, 2016b).

$$S/N_{j,k} = -10 \log \frac{\sum \frac{1}{y^2}}{n} \quad (20)$$

3.6.2 Delineamento composto central rotacional (DCCR)

Os experimentos foram projetados de acordo com o método de superfície de resposta usando o delineamento composto central (DCCR) com o objetivo de otimizar o processo de torrefação e identificar as interações entre variáveis, uma vez que é classificado as variáveis mais significantes realizando o ensaio exploratório pelo método de Taguchi.

Pretende-se identificar se o processo de torrefação segue um modelo linear ou quadrático e isso é observado através de uma equação matemática da relação entre fator e resposta determinado pelo DCCR (BARROS NETO *et al.*, 2016b).

O DCCR será aplicado após verificar, pelo método de Taguchi, os fatores que apresentam uma contribuição baixa ou insignificante para a variabilidade e para a razão S/N. Assim, o DCCR será aplicado para as duas variáveis com maior influência significativa no resultado.

No método DCCR 2^k (k =número de fatores), serão selecionados dois fatores (DCCR 2^2) aplicados para cinco níveis (Tabela 3) a fim de otimizar as respostas de interesse. Considerando o método, são definidos os níveis codificados, sendo o nível central (0) - mínimo de 3 para estimar a variabilidade experimental, níveis baixos e alto - pontos fatoriais (-1; +1), relacionados a rotação dos fatores e níveis axiais baixo e alto - pontos axiais ($-\sqrt{2}$; $+\sqrt{2}$), utilizados para determinar a curvatura da resposta (BARROS NETO *et al.*, 2016b).

Tabela 3 - Fatores e níveis codificados do planejamento experimental do DCCR: 2^2

Fatores codificados	Níveis (codificados)				
	Axial baixo	Baixo	Central	Alto	Axial alto
X_1	$-\sqrt{2}$	-1	0	+1	$+\sqrt{2}$
X_2	$-\sqrt{2}$	-1	0	+1	$+\sqrt{2}$

Fonte: Autoria própria

Na matriz de planejamento experimental prevê-se a realização de 13 experimentos (Tabela 4), sendo 4 testes como pontos axiais ($-\sqrt{2}$; $+\sqrt{2}$), 4 testes como pontos fatoriais (-1; +1) e 5 testes como pontos centrais (0), utilizados para estimar o efeito linear dos fatores e a reprodutibilidade dos dados (BARROS NETO *et al.*, 2016b).

Os experimentos foram executados aleatoriamente de acordo com plano experimental (Tabela 4), sendo encontrados os valores codificados e os reais de tempo de residência e temperatura que serão utilizados, tais valores foram pré-determinados com base no estudo exploratório do método de Taguchi.

Tabela 4 - Matriz de planejamento experimental do DCCR

Experimento	Fatores codificada		Variável resposta
	X ₁	X ₂	
1	-1	-1	Y _{i1}
2	-1	+1	Y _{i2}
3	+1	-1	Y _{i3}
4	+1	+1	Y _{i4}
5	0	-√2	Y _{i5}
6	0	+√2	Y _{i6}
7	-√2	0	Y _{i7}
8	+√2	0	Y _{i8}
9	0	0	Y _{i9}
10	0	0	Y _{i10}
11	0	0	Y _{i11}
12	0	0	Y _{i3}
13	0	0	Y _{i9}

Fonte: Autoria própria

Como DCCR é utilizado para construir um modelo de segunda ordem, é empregado o método de regressão não linear para ajustar o polinômio de segunda ordem aos dados experimentais (SINGH, R. K. *et al.*, 2020a). A equação quadrática polinomial é dada pela equação (21).

$$y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{11}X_{12} + b_{22}X_{22} + b_{12}X_1X_2 \quad (21)$$

sendo y a variável resposta, X₁ e X₂ variáveis independentes codificadas e os coeficientes do modelo de regressão b₀, b₁, b₂, b₁₁, b₂₂, b₁₂.

Os coeficientes serão calculados utilizando a equação matricial representada pela equação (22)

$$b = (X_tX)^{-1} X_ty \quad (22)$$

Para análise do DCCR e as relações entre as variáveis e respostas, é realizado a construção da superfície de resposta e de curvas de contorno a partir dos valores de coeficientes determinados.

3.7 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)

No método de Taguchi, a análise de variância (ANOVA) é aplicada para identificar a significância estatística dos fatores e suas interações no desempenho do processo de torrefação, bem como entender quais fatores têm maior influência na variabilidade da resposta.

A partir dos resultados obtidos na ANOVA avalia-se o fator da matriz experimental com maior significância. Para a análise calcula-se a soma total dos quadrados STQ, equação (23), a soma dos quadrados dos fatores SQ, equação (24), a soma dos quadrados do erro SQ_{erro}, equação (25), soma média quadrática SMQ, equação (26), o grau de liberdade gl, equação (27), e o fator F, equação (28), no qual termina o nível de significância do parâmetro (BARROS NETO *et al.*, 2016b).

$$STQ = \sum (y_i - \bar{y})^2 \quad (23)$$

$$SQ = \sum (y_i - \bar{y})^2 \quad (24)$$

$$SQ_{\text{erro}} = STQ - \sum SQ \quad (25)$$

$$SMQ = \frac{SQ}{gl} \quad (26)$$

$$gl = n - 1 \quad (27)$$

$$F = \frac{SMQ}{SMQ_{\text{resíduo}}} \quad (28)$$

sendo, y_i as variáveis respostas considerando a quantidade de réplicas; n o número de réplicas; $\bar{y}$ a média das variáveis respostas; gl é o grau de liberdade (cada fator consome $n-1$, sendo n o número de níveis da matriz).

No caso da aplicação do método de DCCR, análise de variância (ANOVA) será usada para testar os efeitos dos fatores e efeitos de interação entre fatores e o erro experimental a partir dos coeficientes do modelo de regressão ajustado aos dados experimentais.

Para interpretação da ANOVA será analisado as variáveis como valor p, grau de liberdade (gl), equação (27), valor F, equação (28) e coeficiente de determinação R^2 , equação (29), e coeficiente de determinação ajustado, R_{aj}^2 , equação (30).

$$R^2 = 1 - \frac{SQ \text{ resíduo}}{SQ \text{ total}} \quad (29)$$

$$R_{aj}^2 = 1 - \frac{SMQ \text{ resíduo}}{SMQ \text{ total}} \quad (30)$$

Os valores de F e p são usados para examinar os termos da equação do modelo, com o valor de F as variações nas respostas podem ser demonstrados pela equação de regressão, enquanto o valor de p especifica se o valor de F é suficiente para determinar a importância do modelo estatístico desenvolvido, sendo que o valor de p para o modelo deve ser menor que 0,05 (SINGH, R. K. *et al.*, 2020b).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS BIOMASSAS *IN NATURA*

Na Figura 13 apresentam-se as amostras de casca de arroz (CA), serragem (SE) e sorgo biomassa (SB) antes e depois do pré-tratamento de moagem. Pela análise visual, observa-se que as amostras de biomassa *in natura* possuem colorações similares, na cor de dourado a marrom claro.

Para a caracterização foram utilizadas amostras de biomassa com granulometrias médias (ϕ_m) de 83 μm ($75 < \phi_m < 90$), obtidas entre duas peneiras consecutivas das séries ASTM

Figura 13 – Avaliação visual das biomassas *in natura* (CA, SE e SB) na forma como recebidas e após moagem



Fonte: Autoria própria

Na Tabela 5 estão representados os resultados encontrados da análise composicional para a biomassa *in natura*.

Tabela 5 - Composição química das biomassas *in natura*: CA, SE e SB

Biomassa	Extrativos (%) Eq. (2)	Hemicelulose (%) Eq. (7)	Celulose (%) Eq. (8)	Lignina (%) Eq. (5)	Cinzas totais (%) Eq. (9)
CA	1,56	20,04	38,41	27,25	13,96
SE	4,07	9,53	41,54	29,95	0,52
SB	6,43	25,08	41,4	26,77	4,42

Fonte: Autoria própria

Para as biomassas *in natura* pode-se encontrar estudos na literatura a fim de comparação,

apesar das diferenças entre espécies e origem das biomassas. É possível afirmar que os resultados encontrados nas análises de composição para a biomassa *in natura* estão próximos das referências encontradas por outros pesquisadores, como mostrado no Quadro 3.

Na Tabela 6 contém a média dos valores da análise imediata, análise elementar e de poder calorífico superior para três biomassas *in natura*.

Tabela 6 - Propriedades físico-químicas das biomassas *in natura*: CA, SE e SB

Propriedades	Valores		
	CA	SE	SB
<i>Análise imediata (%m)</i>			
Umidade (U)	3,63	2,94	3,48
Material volátil (MV)	59,34	77,15	81,13
Carbono fixo (CF)	9,19	11,00	7,74
Cinzas (Cz)	27,84	8,91	7,65
<i>Análise Elementar (%m)</i>			
Carbono (C)	39,15	45,06	43,07
Hidrogênio (H _{bs})	4,70	5,43	6,00
Oxigênio (O _{bs})*	33,90	44,83	43,75
Nitrogênio (N)	0,42	0,32	1,18
<i>Poder Calorífico (MJ/kg)</i>			
PCS	13,96	16,47	16,95
PCS _{bs} (BRACHI <i>et al.</i> , 2019b)	14,49	16,97	17,56
PCI _{bs} (CONAG <i>et al.</i> , 2018)	13,55	15,86	16,34

Notas: bs – base seca; * eq. (10)

Fonte: Autoria própria

Apesar das diferenças regionais entre as biomassas, os resultados das análises físico-química das biomassas *in natura* estão próximos das referências encontradas por outros pesquisadores, conforme mostrado no Quadro 4.

Ao analisar os resultados, observa-se que as biomassas apresentam alto teor de material volátil, o que pode resultar na geração descontrolada de gases e vapores durante os processos de queima. O baixo teor de carbono fixo também sugere que a eficiência da combustão pode ser comprometida, devido à menor concentração de compostos de carbono que fornecem calor (ANIZA *et al.*, 2022; CONAG *et al.*, 2017a; KONGTO *et al.*, 2022).

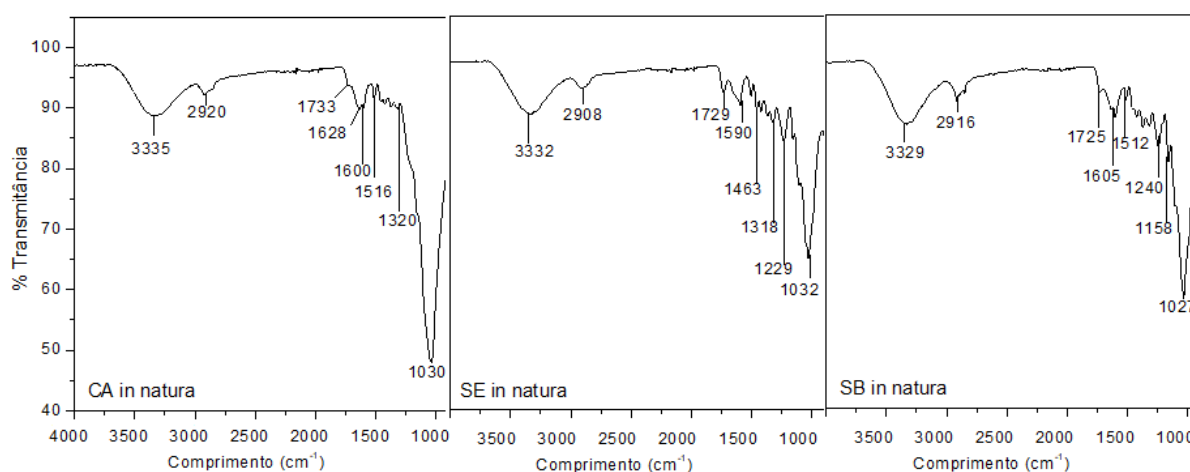
Na amostra CA, a porcentagem de cinzas é elevada, o que reduz a quantidade de calor disponível para o material durante combustão. Os compostos inorgânicos e metais pesados presentes nas cinzas podem obstruir reatores e caldeiras, além de representar um risco ambiental como contaminantes. Nas amostras SE e SB, onde a concentração de cinzas é menor, o poder

calorífico foi superior ao da CA, indicando que uma menor quantidade de cinzas pode ter aumentado a proporção de material combustível na amostra (CHEN et al., 2021c; CHEN; KUO, 2011; GONZÁLEZ MARTÍNEZ et al., 2022).

Outro ponto importante é que a alta porcentagem de voláteis nas amostras SE e SB também contribuiu para elevado poder calorífico. Durante a queima, os voláteis são os liberados primeiro, gerando rapidamente uma quantidade de calor significativa, o que auxilia na combustão dos compostos de carbono (CHEN et al., 2021c; VAN DER STELT et al., 2011).

Na Figura 14 são apresentados os espectros obtidos nas análises de espectroscopia de infravermelho com transformada de fourier (FTIR) para as biomassas in natura.

Figura 14 - Espectro de FTIR das biomassas *in natura*: CA, SE e SB



Fonte: Autoria própria

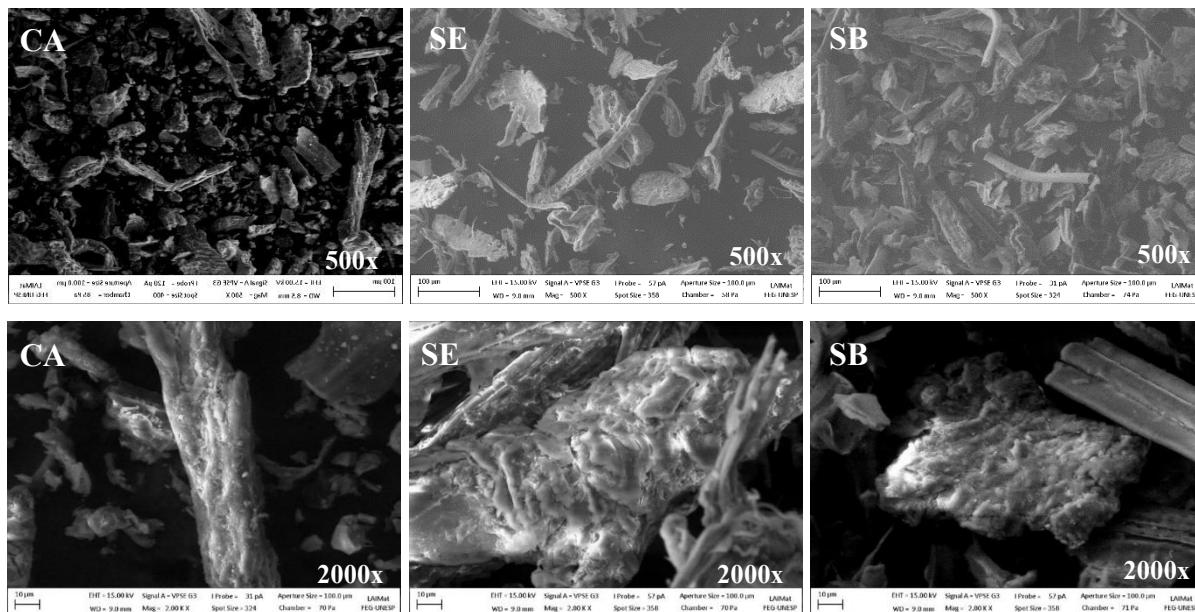
Nos espectros das biomassas *in natura* observa-se bandas longas em 3335; 3329; 3332 cm^{-1} referente ao estiramento da ligação O-H em estruturas fenólicas e alifáticas, tem-se também uma banda de alongamento de C-H em 2920; 2916; 2908 cm^{-1} , características de anéis aromáticos, estruturas fenólicas e anéis aromáticos são os principais grupos funcionais presentes na lignina, hemicelulose e celulose (CHEN et al., 2021b).

As bandas de comprimento em 1733; 1628; 1600 cm^{-1} no espectro da CA, em 1725; 1605 cm^{-1} no espectro do SB, bem como a banda em 1729 cm^{-1} no espectro da SE são típicas de grupos carbonila, carboxila e éster em celulose e hemiceluloses. As bandas menores nas regiões entre 1516; 1512 e 1463 cm^{-1} são dos alongamentos e vibrações de grupos C=C aromático e vibrações esqueléticas aromáticas da lignina. As bandas na região de 1320; 1368; 1318 cm^{-1} são referentes a vibrações de celulose e deformação de celulose e hemicelulose. Já as bandas em 1240; 1158 e 1229 cm^{-1} representam vibrações C-O-C em celulose e hemicelulose.

A banda de maior intensidade nos três espectros em 1030; 1027 e 1032 cm^{-1} é típica da absorção de celulose (LIU *et al.*, 2006; ONG *et al.*, 2021).

As diferenças morfologias entre as biomassas *in natura* foram determinadas, sendo que as imagens MEV são apresentadas na Figura 15.

Figura 15 - Imagens de MEV (ampliação de 500 e 2000x) das amostras de biomassas *in natura*: CA, SE e SB



Fonte: Autoria própria

Observa-se que a morfologia da CA e SB apresenta formas mais alongadas e fibrosas, na SE as partículas possuem tamanhos e formas mais irregulares.

Nas amostras *in natura*, observa-se a presença de configurações ramificadas, possivelmente resultantes da rede de hemicelulose, um polissacarídeo ramificado. As superfícies das biomassas exibem estruturas predominantemente lamelares, com formas irregulares e poucos poros aparentes (CHEN *et al.*, 2012a; MARTÍN-LARA *et al.*, 2017a).

4.2 ÍNDICE DE COMBUSTÃO DAS BIOMASSAS *IN NATURA*

A propriedades de combustão das biomassas *in natura* foram determinados para avaliar o comportamento das biomassas para aplicação como combustíveis. Essas propriedades referem-se aos índices combustão, dadas pela proporção para combustível (FR), índice de combustibilidade (IC) e inflamabilidade volátil (IV). Na Tabela 7 são apresentados os índices de combustão para as biomassas *in natura*.

Tabela 7 - Índices de combustão para as biomassas *in natura*: CA, SE e SB

Biomassa	FR Eq. (13)	IC (MJ/kg) Eq. (14)	IV (MJ/kg) Eq. (15)
CA	0,2	78,14	17,24
SE	0,1	124,98	15,92
SB	0,1	190,36	16,94

Fonte: Autoria própria

O IC é utilizado para avaliar a facilidade da biomassa ao entrar em combustão (SINGH, R. kumar *et al.*, 2019a). Os valores de IC foram altos, devido ao elevado material volátil encontrado nas biomassas, que auxiliam na rápida liberação de calor durante a queima.

A IV representa a energia dos matérias voláteis no combustível, assumindo que o carbono fixo da amostra seja puro (SINGH, R. kumar *et al.*, 2019b). Como as amostras contém elevado valor de material volátil, o índice também foi elevado, porém vale ressaltar que quando o valor é muito alto pode oferecer instabilidade durante a combustão.

O índice FR indica a relação entre o carbono fixo e o teor de matéria volátil no combustível, os baixos valores encontrados indicam maior facilidade de combustão porque o material contém mais matéria volátil (CONAG et al., 2017b).

De acordo com a literatura, os valores de FR utilizados em usinas termoeletricas variam entre 0,5 a 3,0, para IC de combustível misto com carvão, o valor mais usual está entre 12,5 MJ/kg, e 23 MJ/kg, enquanto para IV espera-se um valor superior a 14 MJ/kg (CONAG et al., 2017b).

4.3 MÉTODO DE TAGUCHI APLICADO À TORREFAÇÃO DAS BIOMASSAS

4.3.1 Definição fatores e valores reais para os níveis

A partir do conhecimento das propriedades físico-químicas das biomassas *in natura*, bem como seus índices de combustão, foi verificada na literatura os fatores mais relevantes para o estudo do processo de torrefação a fim de definir um planejamento experimental exploratório. Devido à sua abordagem sistemática e eficiente para identificar e explorar os fatores que afetam a qualidade e o desempenho de um processo, utilizou-se o método de Taguchi.

É de conhecimento, que o tempo de residência e temperatura de processos, são os parâmetros que mais afetam o processo de torrefação. Optou-se em incluir no planejamento a quantidade de amostra e granulometria média das partículas de biomassa.

Assim, os 4 fatores (A, B, C, D) definidos para o estudo do processo de torrefação das biomassas foram: temperatura de processo ($T/^{\circ}\text{C}$); tempo de residência, considerado o tempo de isoterma (t/min); quantidade de massa de amostra (M/g) e granulometria média das partículas de biomassa ($\phi_m/\mu\text{m}$).

Os valores definidos para o estudo da torrefação das biomassas avaliadas para os 3 níveis (Baixo, Médio e Alto) são apresentados na Tabela 8. Optou-se pelas temperaturas de 200, 250 e 300 $^{\circ}\text{C}$ para representar, respectivamente, condições de torrefação leve, média e severa.

Os valores de ϕ_m iguais a 83 μm , 231 μm e 550 μm referem-se aos valores médios entre as peneiras consecutivas da série ASTM, sendo de $75 < \phi_m < 90$, $212 < \phi_m < 250$ e $500 < \phi_m < 600$), respectivamente. A escolha dessas faixas granulométricas deveu-se à limitação do cadinho de alumina utilizado no processo de torrefação, com dimensões de 50 mm de diâmetro por 10 mm de altura, que impôs restrições ao tamanho das partículas que poderiam ser processadas adequadamente.

Tabela 8 - Valores reais dos fatores definidos para os três níveis

Fatores	Níveis		
	Baixo (1)	Médio (2)	Alto (3)
A - Temperatura ($T/^{\circ}\text{C}$)	200	250	300
B - Tempo de isoterma (t/min)	30	40	50
C - Massa de amostra (M/g)	1	3	5
D - Granulometria média ($\phi_m/\mu\text{m}$)	83	231	550

Fonte: Autoria própria

As combinações entre os fatores com seus respectivos fatores reais são apresentadas na Tabela 9, sendo que todos os 9 experimentos foram realizados em duplicata.

Tabela 9 - Matriz ortogonal Taguchi L9

EXP	Valores Reais			
	T/°C	t/min	M/g	$\phi_m/\mu\text{m}$
1	200	30	1	83
2	200	40	3	231
3	200	50	5	550
4	250	30	3	550
5	250	40	5	83
6	250	50	1	231
7	300	30	5	231
8	300	40	1	550
9	300	50	3	83

Fonte: Autoria própria

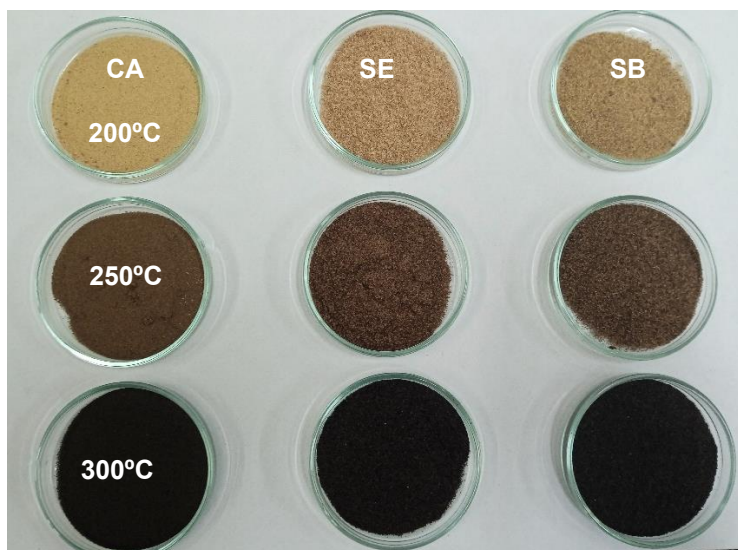
A partir das definições dos valores reais descritos na matriz de Taguchi, procederam-se os ensaios de torrefação das biomassas conforme descrito na seção de metodologia.

4.3.1.1 Avaliação visual das amostras torrificadas

Na Figura 16 apresentam-se as diferenças de coloração da biomassa após torrefação comparada às biomassas *in natura* (Figura 12). Foram escolhidas as amostras obtidas a partir dos experimentos EXP1, EXP5 e EXP9 da matriz de Taguchi, onde a temperatura variou de 200 °C; 250 °C e 300 °C. Demais amostras obtidas nessas temperaturas apresentaram colorações similares.

As mudanças na coloração para diferentes temperaturas de processo podem ser explicadas pela degradação dos componentes orgânicos e reações químicas que ocorreu durante a torrefação. Em temperatura de 200 °C, a hemicelulose presente na estrutura da biomassa começa a se decompor em voláteis, iniciando sua carbonização e fazendo com que a biomassa fique com uma cor mais escura. Durante a torrefação quando se atinge 250 °C até 300 °C, começam as reações de Maillard entre os açúcares (glucose, xilose, arabinose, galactose e manose) e compostos nitrogenados (proteínas, aminas, aminoácidos) presentes nas estruturas da biomassa, resultando assim em compostos poliméricos (melanoidinas), que variam de marrom-claro à cor preta (CHEN *et al.*, 2022a; CHEN; KUO, 2010).

Figura 16 - Avaliação visual das amostras de CA, SE e SB após a torrefação



Fonte: Autoria própria

Outro fator importante para a mudança de coloração são as reações de reticulação, reações de condensação e de oxidação da clivagem das ligações de éter e grupos metil aromáticos na lignina, tais reações levam a formação de produtos oxidativos intermediários como quinonas, que facilitam a mudança visual quando reagem com outros compostos da biomassa (CHEN *et al.*, 2022b; VAN DER STELT *et al.*, 2011a).

4.3.1.2 Análise imediata e poder calorífico superior das amostras torrificadas

É necessário caracterizar as amostras torrificadas, bem como calcular o rendimento do processo para verificar quais as propriedades serão utilizadas para otimizar o processo pelo método de Taguchi.

Assim, procederam-se as análises imediatas - umidade (U), material volátil (MV), carbono fixo (CF) e cinzas (Cz), determinação do poder calorífico superior (PCS) e cálculo do rendimento (RM) para todas os experimentos indicados na matriz L9 de Taguchi (Tabela 9).

Os ensaios foram executados em duplicada, sendo obtidas 18 amostras torrificadas por biomassa, nessa etapa, não foi determinada a análise elementar, apesar de sua relevância, devido ao alto custo dos ensaios externos considerando o total de 54 ensaios. Na Tabela 10 são apresentadas as médias dos valores da caracterização para todos os experimentos realizados nas três biomassas.

Tabela 10 - Valores médios análise imediata e poder calorífico superior das amostras CA, SE e SB torrificadas

EXP	Biomassa	Análise Imediata (%)				PCS (MJ/kg)	PCS _{bs} (MJ/kg)	RM (%) Eq. (16)
		U	MV	PCS (MJ/kg)	Cz			
1	CA	2,7	59,4	11,5	23,5	14,2	14,5	92,4
2		1,5	67,1	15,3	12,6	16,3	16,5	92,1
3		1,8	68,0	14,7	12,8	16,3	16,6	90,5
4		3,0	66,1	16,9	12,9	16,2	16,7	87,9
5		2,8	59,5	15,5	21,0	14,8	15,2	85,4
6		1,3	65,5	17,3	11,9	16,8	17,0	87,8
7		3,0	54,2	26,2	15,6	17,2	17,7	70,2
8		1,8	53,6	24,4	16,4	16,8	17,1	71,4
9		1,6	38,8	23,9	31,2	14,7	14,9	61,2
1	SE	2,8	84,2	13,0	3,5	17,6	18,1	90,2
2		2,6	82,6	11,7	0,2	17,7	18,2	89,9
3		2,3	84,9	12,5	2,1	17,8	18,2	88,8
4		1,2	83,6	12,4	1,0	17,5	17,7	87,4
5		3,0	85,8	15,1	5,5	17,7	18,2	86,3
6		2,8	81,0	14,9	0,2	18,4	18,9	87,1
7		0,8	73,5	22,1	0,1	20,5	20,7	65,5
8		2,9	76,3	20,8	1,6	19,9	20,5	69,8
9		2,8	67,1	28,4	1,3	21,3	21,9	52,1
1	SB	1,2	76,2	15,4	4,5	18,2	18,4	91,0
2		2,0	71,9	16,4	6,4	17,9	18,3	90,2
3		3,1	71,9	17,4	5,9	17,1	17,6	90,8
4		1,9	74,8	17,7	0,5	18,3	18,7	83,5
5		2,5	71,3	20,0	3,9	19,4	19,9	66,2
6		2,8	69,7	17,8	6,3	18,4	18,9	81,6
7		2,2	56,8	32,3	6,0	21,3	21,8	53,2
8		2,2	56,7	33,4	5,8	20,3	20,8	55,2
9		3,3	49,3	35,9	9,8	20,8	21,5	39,6

Fonte: Autoria própria

Em análise geral apesar das condições diferentes para cada experimento, devido ao tempo e massa distintos aplicados, o teor de umidade diminuiu ao decorrer dos experimentos, isso porque a etapa inicial da torrefação é a perda de água presente na biomassa, que se inicia em 100 °C (VAN DER STELT *et al.*, 2011a).

Comparada à biomassa *in natura* (Tabela 6), a perda dos materiais voláteis foi mais acentuada nos experimentos a 300 °C, na CA a perda foi de 20,51% na amostra torrificada à

300 °C por 50 min, nas mesmas condições para o SB a perda foi de 31,87% após torrefação, já a SE de 10,09%. A liberação dos voláteis orgânicos mais leves aumenta conforme a severidade da torrefação devido à degradação dos principais componentes da biomassa como hemicelulose, celulose e ácidos orgânicos (HU *et al.*, 2020b; VAN DER STELT *et al.*, 2011a).

A diminuição dos voláteis é uma característica importante para um melhor aproveitamento e armazenamento após torrefação, uma vez que o material diminui de tamanho após a queima. Com a perda de materiais voláteis, o carbono fixo aumenta e a amostra passa a ter maiores porcentagens de material carbonoso e apresentar melhores rendimentos em processos de conversão térmica (CHEN, W. H. *et al.*, 2021a). Observa-se que o carbono fixo aumentou em todas as condições aplicadas, para a CA aumentou 17,02% na amostra torrificada em 300 °C por 30 min, já no SB o aumento foi de 28,15% e na SE de 17,42% de carbono fixo nas amostras após tratamento em 300 °C por 50 min.

À medida que a temperatura aumenta, a água e o material orgânico volátil presente na biomassa vão se desprendendo e concentrando o material carbonoso não volátil. Com isso observa-se que a porcentagem de CF, para as amostras SE e SB, foi maior no EXP9 e para a amostra CA foi no EXP7. Nesses experimentos foram aplicadas a maior temperatura (300 °C).

O teor de cinzas variou bastante entre os experimentos em relação às biomassas *in natura*, isso se deve as três variações de massas e granulometrias aplicadas nos experimentos de Taguchi que causou diferenças na comparação do teor de cinzas. Importante ressaltar que na CA, por exemplo, nos experimentos (EXP1, EXP5 e EXP9) onde foi utilizado menor granulometria (83 mm) o teor de cinzas foi mais alto. No entanto, para a amostra SB onde se utilizou menores massas (1 e 3g), (EXP2, EXP6 e EXP9) a porcentagem de cinzas foi maior. No caso da amostra SE que já apresenta o teor de cinzas baixo, a porcentagem foi maior nos EXP1 e EXP5 onde a granulometria utilizada foi menor.

Como esperado, com o aumento do carbono fixo eleva-se também o PCS comparada à biomassa *in natura*. Nos experimentos o aumento foi de acordo com a severidade da torrefação dada por temperatura mais alta. Os valores variaram comparando biomassa *in natura* e após torrefação: 23,28% na CA, 22,94% no SB e 29,26% na SE. O ganho de poder calorífico nas biomassas se deve a uma série de fatores, primeiro a remoção de moléculas de baixo poder calorífico na biomassa, como moléculas de água e compostos orgânicos pequenos com baixo teor de carbono, outro fator é a degradação e despolimerização de hemicelulose e celulose que faz com que se concentre mais lignina na amostra, sendo a mesma rica em estruturas aromáticas estáveis de alto poder calorífico (CHEN; KUO, 2011a; VAN DER STELT *et al.*, 2011a).

Considerando o efeito da massa no PCS, o EXP7 foi o com maior valor de PCS para as amostras CA e SB (5 mg) e para SE o maior foi do EXP9 (3 mg). No caso das amostras CA e SE, referem-se aos maiores valores de CF obtidas na maior temperatura (300 °C), que pode explicar o fato. Para a amostra SB, apesar de não ter o maior valor de CF, ela está entre os maiores, que também foi obtida na maior temperatura.

O rendimento em massa (RM%) foi calculado segundo equação (16), o carbono fixo (CF%) foi determinado pela análise imediata e o poder calorífico (PCS MJ/kg) pela bomba calorimétrica. Nota-se que o EXP1 foi o com maior RM para as três biomassas. Devido à temperatura e tempo de residência de 200 °C e 30 min, respectivamente, ocorreu uma menor liberação de voláteis e umidade nas amostras, mantendo-as com maior massa.

Em suma, o processo de torrefação provocou o decaimento de umidade e voláteis das biomassas e no aumento significativo das porções de carbono fixo e poder calorífico superior. Esses resultados foram semelhantes a de outros autores na literatura que utilizaram o pré-tratamento para melhorar as propriedades da biomassa *in natura* (GONG *et al.*, 2019; HU *et al.*, 2020b; ZENG *et al.*, 2019).

4.3.1.3 Índices de combustão das amostras torrificadas

Os índices de combustão estão relacionados aos valores obtidos na análise imediata e PCS. Assim, não é necessário incluir esses parâmetros para análise das variáveis resposta de interesse.

Os índices de combustão foram determinados para avaliar mais uma vez o desempenho da torrefação e a eficiência das biomassas como combustível, sendo os resultados obtidos para todas as condições definidas na matriz de Taguchi são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Valores dos índices de combustão das amostras CA, SE e SB torrificadas

EXP	Amostra	FR Eq. (13)	IC (MJ/Kg) Eq. (14)	IV (MJ/Kg) Eq. (15)
1	CA	0,2	64,0	16,6
2		0,2	69,5	16,2
3		0,2	73,1	16,1
4		0,3	61,8	15,2
5		0,3	50,8	15,3
6		0,3	62,4	16,4
7		0,5	33,7	14,6
8		0,5	34,7	15,4
9		0,6	19,1	16,5
1	SE	0,2	121,2	15,2
2		0,1	136,8	16,1
3		0,1	129,3	15,5
4		0,1	128,5	15,7
5		0,2	105,2	14,2
6		0,2	109,6	16,0
7		0,3	74,6	17,6
8		0,3	78,7	16,2
9		0,4	54,4	16,7
1	SB	0,2	95,1	16,8
2		0,2	81,2	16,8
3		0,2	73,6	15,0
4		0,2	84,4	16,1
5		0,3	73,1	17,1
6		0,3	74,9	17,2
7		0,6	38,8	17,5
8		0,6	35,8	15,2
9		0,7	28,7	16,6

Fonte: Autoria própria

Analisando os resultados da Tabela 11, para FR somente na CA e SB e nas condições de 300 °C de torrefação os valores de FR foram maiores que 0,5. Sendo a proporção para combustível uma relação entre o CF e MV, isso mostra que na temperatura de 300° C e nos tempos de 10, 30 e 50 min foram suficientes para diminuir a quantidade de MF e aumentar o FR. Os valores baixos de FR indicam que a biomassa entra em combustão facilmente, porém é mais difícil de controlar, pois a quantidade de material volátil é maior, podendo assim causar uma combustão incompleta. Pela Tabela 10 observa-se que os valores de MV da amostra SE foram altos, o que causou baixo índice de FR (CONAG et al., 2017b; SINGH; CHAKRABORTY; MONDAL, 2019, 2020).

Em comparação com a biomassa *in natura* (Tabela 11) o IC diminuiu 24,46% na CA, 15,05% no SB e 43,52% na SE. Um melhor resultado de IC para a biomassa torrificada pode ser encontrado administrando a proporção de mistura com carvão ou então otimizando as condições experimentais para melhores respostas (SINGH, S. *et al.*, 2019, 2020).

Em todas as condições experimentais de torrefação testadas foram suficientes para manter a biomassa com IV adequado acima de 14 MJ/Kg. Em outros estudos onde também foi utilizado temperaturas de 250 e 300 °C de torrefação, o índice de IV se manteve adequado para a biomassa testada (CONAG et al., 2017b; SINGH; SARKAR; CHAKRABORTY, 2019).

4.3.1.4 Análise elementar das amostras torrificadas

Apesar de sua relevância, não foi determinada a análise elementar para todas as condições, devido ao alto custo dos ensaios externos considerando o total de 54 ensaios.

Na Tabela 12 são apresentados os resultados das porcentagens dos elementos C, H, O e N em base seca para as amostras de 83 µm torrificadas em condições leve (EXP 1), médio (EXP 5) e severo (EXP 9).

Tabela 12- Análise elementar (% massa -base seca) das biomassas CA, SE e SB torrificadas

EXP	Amostra	C	H	O*	N
1	CA	38,09	4,67	29,21	0,79
5		38,55	4,40	31,62	0,82
9		40,72	3,32	19,12	1,11
1	SE	49,34	5,78	36,74	0,23
5		50,91	5,71	32,39	0,21
9		56,18	4,83	34,67	0,26
1	SB	45,18	5,54	42,44	0,77
5		49,61	5,56	36,97	0,81
9		55,17	4,46	25,08	1,15

Nota: *eq. (10)

Fonte: Autoria própria

Pela análise elementar é possível notar a alteração na composição dos elementos C, H, N e O durante a torrefação. A principal mudança foi que após o pré-tratamento as amostras continham maior teor de C que a biomassa *in natura*, porém menor teor de O e H.

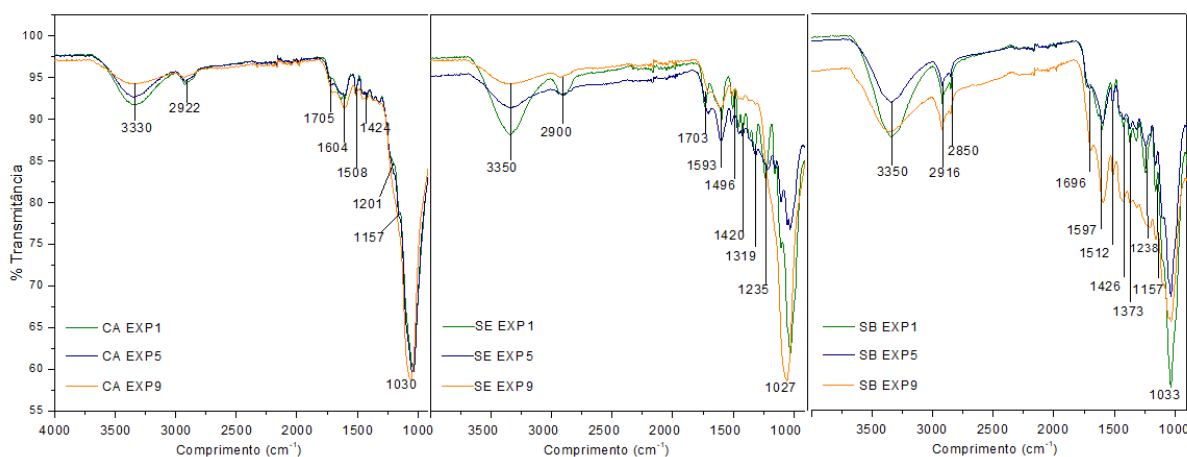
Os elementos O e H presente foi reduzido com o aumento da temperatura via reações de descarboxilação e desidratação da hemicelulose e da celulose despolimerizada. Esses compostos contêm grupos com abundância de O e H, como COOH e OH, na sua estrutura

molecular. Em razão disso a porcentagem de C aumentou, 1,0% na CA, 10,55% para SB e 9,75% na SE após torrefação. A maior concentração de C se deve a ligações covalentes estáveis a temperatura de torrefação e a resistência de polímeros presentes na biomassa a degradação térmica. Por exemplo, a lignina, rica em ligações fenólicas C-C, pela análise química composicional as biomassas torrificadas na temperatura de 300 °C foram as que continham maior teor de lignina na composição (CHEN *et al.*, 2014; WANG *et al.*, 2019; YUE *et al.*, 2017).

4.3.1.5 Análise de FTIR das amostras torrificadas

Dentre os experimentos de Taguchi, realizaram-se as análises de FTIR para os EXP1, EXP5 e EXP9 a fim de comparar as mudanças na estrutura química nas três temperaturas (200,250,300 °C) de torrefação avaliadas. Realizou-se a comparação com três dos nove experimentos pois os demais experimentos executados nas mesmas temperaturas tiveram perfis semelhantes.

Figura 17 - Espectro de FTIR das biomassas CA, SE e SB torrificadas



Fonte: Autoria própria

Observa-se na Figura 17, comparado aos espectros das biomassas *in natura* (Figura 14), que após a torrefação que a região com mais mudanças é entre 1000 e 1500 cm⁻¹, onde a intensidade das bandas variou conforme as diferentes temperaturas de torrefação, uma das causas é a decomposição de hemicelulose, que gera quebra de grupamento químicos modificando a intensidade das bandas (IVANOVSKI *et al.*, 2021).

Observa-se também no espectro da CA e SE, diminuição da intensidade das bandas em 3330 e 3350 cm⁻¹, relacionadas ao estiramento de grupo O-H, isso se deve a quebra da ligação

de H entre álcool e fenol na estrutura. Tal fato contribui para que a biomassa seja mais higroscópica, aumentando sua resistência a umidade. Os picos nos três espectros entre $2900 - 2850\text{ cm}^{-1}$, $1703 - 1508\text{ cm}^{-1}$ e $1201 - 1373\text{ cm}^{-1}$ representam vibrações de ligações C-O, C-C, C-H e C-O-C em hemicelulose e celulose, pode-se observar que no EXP9, quanto aumentou a temperatura de torrefação houve diminuição na intensidade e até o desaparecimento de alguns picos nestas regiões, isso sugere que houve quebra nessas ligações durante o pré-tratamento (SINGH, S. *et al.*, 2020).

As bandas características de lignina ficaram mais acentuadas, comparadas com as amostras *in natura*. As bandas em 1508 , 1512 , 1597 , 1593 , 1496 , 1426 e 1424 cm^{-1} são de vibração aromática de C=O e vibrações de grupos C=C aromático na lignina (ZHENG *et al.*, 2015).

De forma geral a análise de FTIR auxiliou a caracterização das biomassas lignocelulósicas, uma vez que foi possível identificar as ligações referentes aos principais componentes da biomassa, como hemicelulose, celulose e lignina, se observa que com o processo de torrefação comparando os três experimentos analisados, houve variação de intensidade e desaparecimento de bandas, provocando a mudança na estrutura química da biomassa.

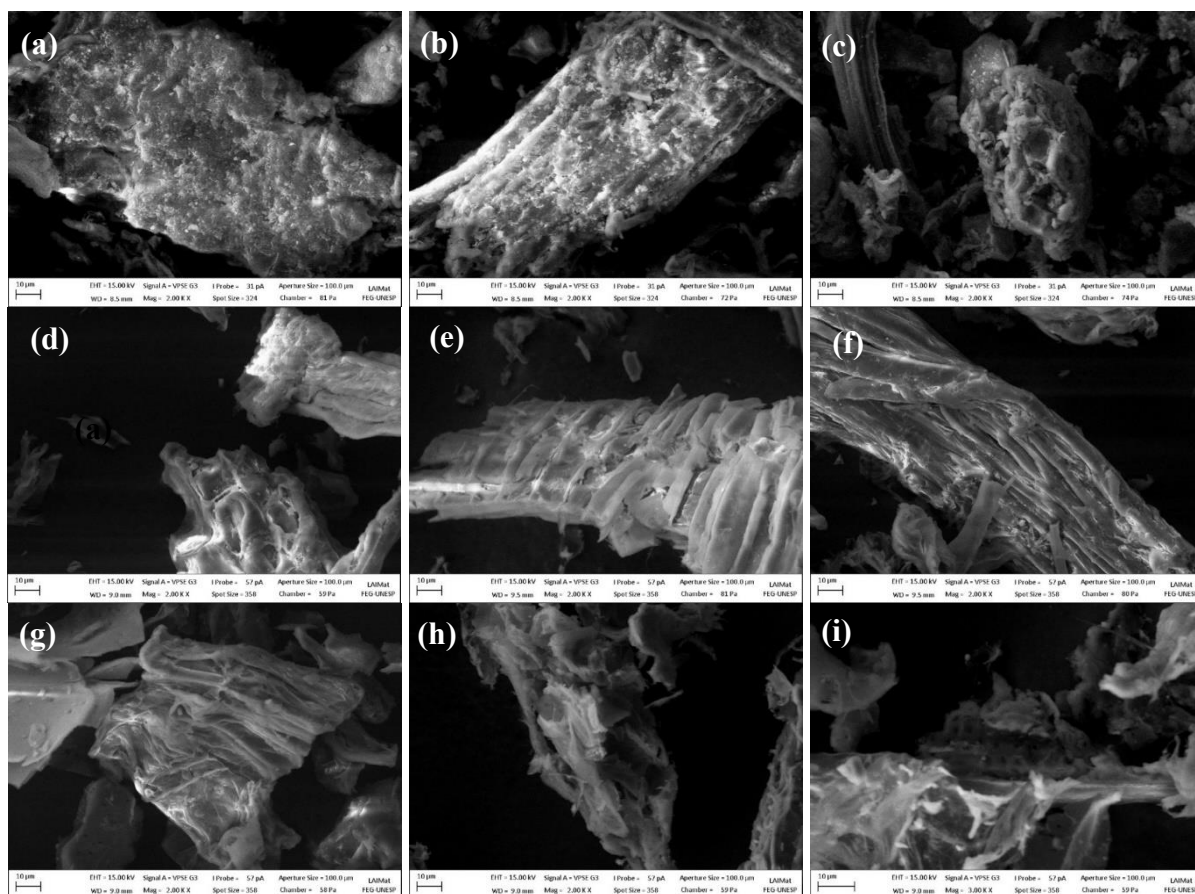
4.3.1.6 Imagens MEV das amostras torrificadas

Na Figura 18 são apresentadas as microestruturas superficiais das biomassas torrificadas referentes aos experimentos EXP1, EXP5 e EXP9. As amostras obtidas com a mesma temperatura não apresentam muitas mudanças na estrutura morfológica, sendo assim realizou-se a comparação com três dos nove experimentos.

Ao aplicar a técnica de MEV é possível observar mudanças na morfologia nas amostras torrificadas comparadas às amostras de biomassa *in natura* (Figura 15).

Com o processo de torrefação observa-se mudanças na estrutura fibrosa e na tenacidade na superfície da biomassa, nas imagens das biomassas *in natura* observa-se espécies fibrosas, porém mais lisas, ao longo do processo de torrefação, as superfícies estão mais irregulares com fissuras, trincas e poros mais visíveis, isso se deve ao aumento da temperatura de torrefação que proporciona a liberação de voláteis e decomposição térmica de grupos metoxil da hemicelulose (MARTÍN-LARA *et al.*, 2017b).

Figura 18 - Imagens de MEV (ampliação de 2000x) das amostras torreficadas: CA (a) 200 °C EXP1; (b) 250 °C EXP5 e (c) 300 °C EXP9 - SE (d) 200 °C EXP1; (e) 250 °C EXP5 e (f) 300 °C EXP9 - SB (g) 200 °C EXP1; (h) 250 °C EXP5 e (i) 300 °C EXP9.



Fonte: Autoria própria

Em outros estudos também foram evidentes as diferenças na morfologia após o pré-tratamento, como por exemplo a formação de estruturas microporosas e danos estruturais devido a menores concentrações de hemicelulose na serragem e na casca de arroz após torrefação a 270 °C (CHEN *et al.*, 2012b).

4.3.2 Variáveis de interesse utilizadas para a otimização da torrefação

Considerando as observações descritas anteriormente, verifica-se que respostas de interesse, variáveis resposta (Y_{ij}), para avaliar a qualidade do processo de torrefação referem-se ao RM, CF, PCS (base úmida) e MV das amostras após a torrefação.

4.3.2.1 Efeitos dos fatores sobre a média (M) e sinal/ruído (S/N)

A partir dos resultados obtidos para todos os ensaios de torrefação (Tabela 10), fez-se a análise dos efeitos dos fatores sobre a média, equação (19), e sobre o sinal/ruído (S/N), equação

(20), das variáveis respostas. Os resultados são apresentados na Tabela 13.

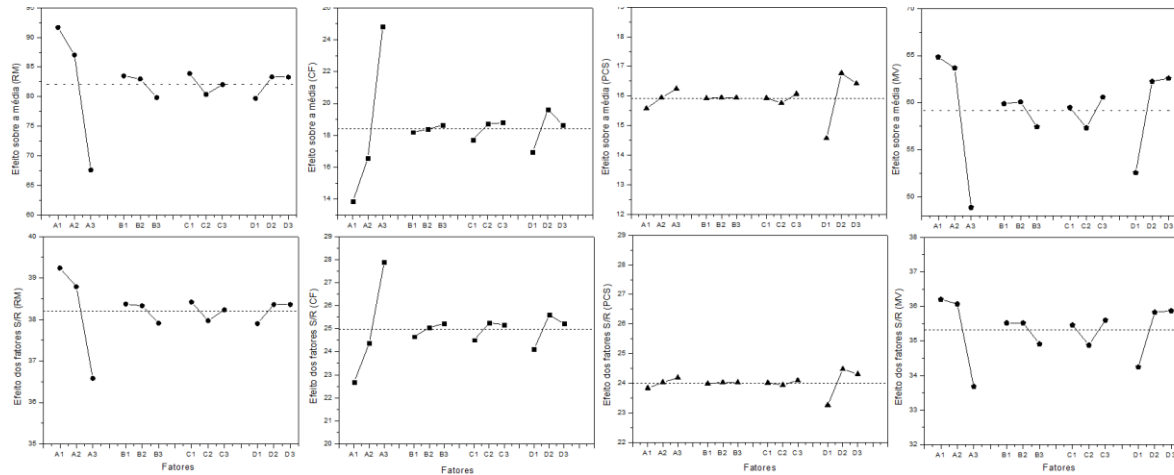
Tabela 13 - Efeitos dos fatores sobre a média (M) e sinal/ruído (S/N) para as amostras CA, SE e SB torrificadas

Fatores	CA								SE								SB							
	RM (%)		CF (%)		PCS (MJ/kg)		MV (%)		RM (%)		CF (%)		PCS (MJ/kg)		MV (%)		RM (%)		CF (%)		PCS (MJ/kg)		MV (%)	
	M	S/N	M	S/N	M	S/N	M	S/N	M	S/N	M	S/N	M	S/N	M	S/N	M	S/N	M	S/N	M	S/N	M	S/N
A1	91,7	39,2	13,9	22,7	15,6	23,8	64,8	36,2	89,7	39,1	12,4	21,8	17,7	25,0	83,9	38,5	90,7	39,2	16,4	24,3	17,8	25,0	73,3	37,3
A2	87,0	38,8	16,6	24,4	15,9	24,0	63,6	36,0	86,9	38,8	14,1	22,9	17,9	25,0	83,5	38,4	77,1	37,7	18,5	25,1	18,7	25,4	71,9	37,1
A3	67,6	36,6	24,8	27,9	16,2	24,2	48,9	33,6	62,4	35,8	23,7	27,4	20,6	26,3	72,3	37,2	49,3	33,8	33,9	30,5	20,8	26,4	54,3	34,5
B1	83,5	38,4	18,2	24,7	15,9	24,0	59,9	35,5	81,0	38,1	15,8	23,6	18,6	25,3	80,4	38,1	75,9	37,4	21,8	26,1	19,3	25,7	69,3	36,6
B2	83,0	38,3	18,4	25,1	15,9	24,0	60,0	35,5	82,0	38,2	15,8	23,7	18,4	25,3	81,6	38,2	70,5	36,8	23,3	26,9	19,2	25,6	66,6	36,4
B3	79,9	37,9	18,7	25,2	15,9	24,0	57,4	34,9	76,0	37,4	18,6	24,8	19,2	25,6	77,6	37,7	70,7	36,4	23,7	26,9	18,8	25,5	63,6	35,9
C1	83,9	38,4	17,7	24,5	15,9	24,0	59,5	35,4	82,4	38,3	16,2	24,0	18,7	25,4	80,5	38,1	75,9	37,4	22,2	26,4	19,0	25,5	67,5	36,5
C2	80,4	38,0	18,7	25,3	15,8	23,9	57,3	34,8	76,5	37,4	17,4	24,0	18,8	25,5	77,8	37,8	71,1	36,5	23,3	26,6	19,0	25,6	65,3	36,1
C3	82,0	38,2	18,8	25,2	16,1	24,1	60,5	35,6	80,2	38,0	16,5	24,1	18,7	25,4	81,4	38,2	70,1	36,7	23,2	27,0	19,2	25,7	66,7	36,3
D1	79,7	37,9	17,0	24,1	14,6	23,3	52,5	34,2	76,2	37,4	18,8	24,9	18,9	25,5	79,0	37,9	65,6	35,8	23,7	26,9	19,5	25,8	65,6	36,1
D2	83,3	38,4	19,6	25,6	16,8	24,5	62,2	35,8	80,8	38,1	16,2	23,8	18,9	25,5	79,0	37,9	75,0	37,3	22,1	26,4	19,2	25,6	66,1	36,2
D3	83,3	38,4	18,7	25,2	16,4	24,3	62,5	35,8	82,0	38,2	15,2	23,3	18,4	25,3	81,6	38,2	76,5	37,5	22,8	26,6	18,6	25,4	67,8	36,6

Fonte: Autoria própria

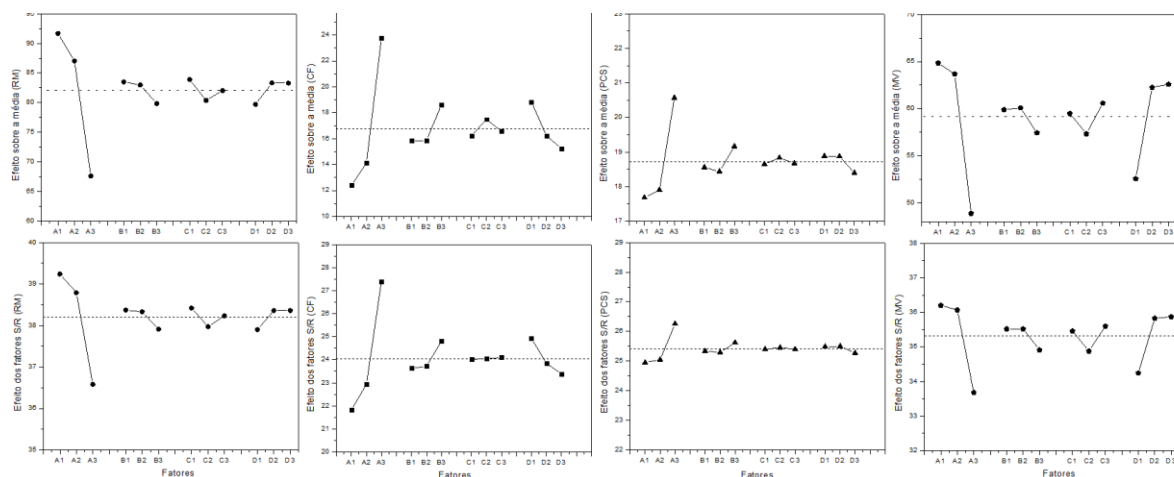
Para uma melhor visualização dos fatores e níveis que mais influenciaram o processo de torrefação, plotou-se os gráficos de efeitos dos fatores sobre a média e sobre o sinal/ruído, Figura 19. A média global calculada pela média dos valores dos testes está representa com a linha tracejada.

Figura 19 - Efeitos dos fatores sobre a média (M) e sinal/ruído (S/N) das variáveis, rendimento (RM), carbono fixo (CF), poder calorífico superior (PCS) e materiais voláteis (MV): amostra CA torrificada



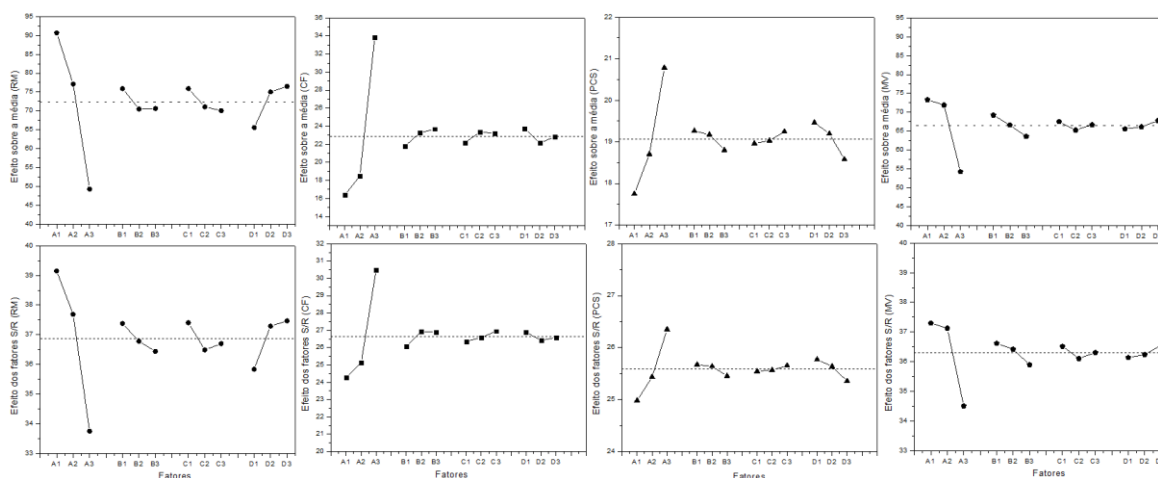
Fonte: Autoria própria

Figura 20 - Efeitos dos fatores sobre a média (M) e sinal/ruído (S/N) das variáveis, rendimento (RM), carbono fixo (CF), poder calorífico superior (PCS) e materiais voláteis (MV): amostra SE torrificada



Fonte: Autoria própria

Figura 21 - Efeitos dos fatores sobre a média (M) e sinal/ruído (S/N) das variáveis, rendimento (RM), carbono fixo (CF), poder calorífico superior (PCS) e materiais voláteis (MV): amostra SB torreficada



Fonte: Autoria própria

Para os gráficos da média avaliou-se como cada nível de um fator afeta a média da resposta, para os gráficos de sinal/ruído avaliou-se como os níveis dos fatores afetam a robustez do processo. Os resultados que apresentam melhor significância para a torrefação, são os que estão acima da média, uma vez que se optou por analisar a condição de Taguchi como “maior é melhor”, equação (20). Os valores numéricos das condições mais significativas podem ser identificados na Tabela 14.

4.3.2.2 Melhores condições de ajuste

A Tabela 14 apresenta a melhor condição de ajuste dos gráficos (Figura 19, 20 e 21), analisados conjuntamente por meio dos gráficos de média e de sinal/ruído, com o objetivo de garantir que a média atenda aos objetivos estabelecidos, minimizando a variabilidade e aprimorando a robustez do processo.

Para variável PCS na CA apresenta-se dois valores de tempo (40 e 50) pois, apresentarem igual significância.

Tabela 14 - Condição de melhor ajuste das amostras CA, SE e SB torrificadas para as variáveis respostas RM, CF e PCS

Amostra	Variáveis respostas	Fatores			
		T/°C	t/min	m/g	$\phi_m/\mu\text{m}$
CA	RM	200	30	1	231
	CF	300	50	5	231
	PCS	300	40 e 50	3	231
	MV	200	40	5	550
SE	RM	200	40	1	550
	CF	300	50	3	83
	PCS	300	50	3	83
	MV	200	40	5	550
SB	RM	200	30	1	550
	CF	300	50	3	83
	PCS	300	30	5	83
	MV	200	30	1	550

Fonte: Autoria própria

Para a amostra CA as condições de melhor ajuste identificadas não foram testadas na matriz L9. Para o SB as variáveis RM, PCS e MV não foram previstas, porém, para a variável CF a melhor condição foi o EXP9. No caso da amostra SE, as variáveis RM e MV não foram testadas, sendo que para as demais a melhor condição foi o EXP9.

4.3.2.3 Validação das melhores condições de ajuste

Como o método de Taguchi é um fatorial fracionado nem todas as condições experimentais foram previstas pela matriz L9, sendo assim realizou-se o experimento de validação das condições não realizadas. Os resultados dos experimentos de validação são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Validação dos experimentos das melhores condições de ajuste para as amostras CA, SE e SB torrificadas

Amostra	Fatores				Resposta (Y)			
	A T/°C	B t/min	C m/g	D f _m /μm	RM (%)	CF (%)	PCS (MJ/kg)	MV (%)
CA	200	30	1	231	93,58	n.a.	n.a.	n.a
	300	50	5	231	n.a	26,04	n.a.	n.a
	300	40 e 50	3	231	n.a	n.a.	17,74 e 16,57	n.a
	200	40	5	550	n.a	n.a	n.a	71,63
SE	200	40	1	550	90,89	n.a.	n.a.	n.a
	200	40	5	550	n.a	n.a	n.a	84,73
SB	200	30	1	550	89,98	n.a.	n.a.	n.a
	300	30	5	83	n.a	n.a.	20,32	n.a
	200	30	1	550	n.a	n.a	n.a	77,54

Nota.: n.a. – não aplicável

Fonte: Autoria própria

Ao realizar o experimento de validação das condições de melhor ajuste para as variáveis respostas, comparou-se os resultados com os da matriz L9 para ver se os experimentos de validação foram comprovados como tendo melhores resultados.

Para a amostra CA, nota-se que a porcentagem CF obtido na validação, apesar da pouca diferença foi maior no EXP7 (26,21%). O RM e MV foi maior no experimento de validação e o PCS foi maior no experimento de validação com o tempo de 40 min. O RM para a amostra SE foi maior no experimento de validação, confirmando assim a melhor condição experimental para esta variável, já a variável MV, apesar da pouca diferença foi maior no EXP5 (84,8%). Para a amostra SB o maior rendimento foi no EXP1 (90,96%) e o PCS foi maior no EXP9 (20,84 MJ/kg) e para MV foi maior no experimento de validação.

Analisando de forma geral as condições experimentais e as respostas das biomassas em relação às variáveis, para maiores valores de RM e MV, a temperatura de 200 °C foi o fator que se repetiu nas condições para as três biomassas. Com uma temperatura menor a quantidade de voláteis orgânicos desprendidos na torrefação é menor, por isso o rendimento e materiais voláteis ainda é alto em torrefações mais suaves.

Em relação ao CF e PCS, a temperatura de 300 °C e o tempo de residência maior, 50 min, foram os que deram melhores valores de resposta. Ao contrário do RM, uma temperatura e tempo mais elevados, causam uma torrefação mais severa, onde irá liberar mais voláteis e concentrar mais material carbonoso na biomassa, com isso a perda de massa é maior, porém a

DE é mais alta.

4.3.2.4 Composição química das amostras nas melhores condições de ajustes

A caracterização físico-química para as amostras obtidas nas melhores condições, descritas na Tabela 14, para as respostas, Y – RM, CF, PCS e MV foram avaliadas.

Na Tabela 16 estão representados os resultados da análise composicional para as 9 amostras obtidas nas melhores condições.

Tabela 16 - Composição química das amostras CA, SE e SB torrificadas para as condições de melhor ajuste

Amostra	Melhor ajuste	Hemicelulose	Celulose	Lignina	Cinzas totais
CA	RM	22,12	38,29	32,31	13,61
	CF	4,12	30,85	53,95	19,48
	PCS	2,54	25,17	61,4	19,94
	MV	18,30	36,47	31,94	13,34
SE	RM	16,45	54,56	32,29	0,37
	CF / PCS	1,9	39,01	60,84	2,2
	MV	14,25	45,87	38,83	0,41
SB	RM	26,5	34,33	28,29	5,8
	CF / PCS	1,86	14,16	72,89	12,01
	MV	26,02	39,81	28,43	5,4

Fonte: Autoria própria

Para as biomassas torrificadas a comparação com a literatura é dificultada uma vez que os parâmetros e condições para torrefação modificam de autor para autor.

Observa-se na Tabela 16 que não são apresentados os valores do teor de extrativos, visto que no processo de torrefação eles são facilmente volatilizados.

As diferenças de valores entre as biomassas *in natura* (Tabela 5) e após torrefação (Tabela 16), indicam que os componentes hemicelulose e celulose foram decompostos termicamente nos experimentos de 300 °C (CA-CF/PCS; SB-CF/PCS, SE-CF/PCS), tendo maior percentual de lignina na estrutura das amostras. Tal decaimento foi semelhante a outros estudos, que mostraram que acima de 290 °C a hemicelulose e celulose foram destruídas pelo processo térmico comparado às amostras *in natura* (CHEN; KUO, 2011a), sendo também observado o mesmo comportamento para a amostras de biomassa de madeira pinus torrificadas em temperatura de 300 °C (HE *et al.*, 2019).

A diminuição do teor de hemicelulose pode ser explicada pela sua degradação que se inicia com a desidratação e quebra de ligações entre substituintes e as cadeias terminais e laterais poliméricas em temperaturas de 200 °C. Tal mecanismo é favorecido pelo aumento da temperatura que também quebra das ligações de grupos acetila e decompõem os açúcares, como glucose, xilose e arabinose, presentes nos polissacarídeos da biomassa (CANDELIER *et al.*, 2011a; COLLARD; BLIN, 2014; MELKIOR *et al.*, 2017; MUNDIKE *et al.*, 2016).

A quebra na concentração da celulose também ocorre com sua degradação em 300° C, porém em temperaturas em torno de 200 e 280 °C ocorrem reações de despolimerização nas unidades glicosídicas e desidratação da estrutura fibrosa, liberando água intermolecular através de ligações de hidrogênio entre cadeias de celulose, sucede-se também liberação de monóxido de carbono, dióxido de carbono e pequenos grupos orgânicos (GONZÁLEZ MARTÍNEZ *et al.*, 2022; WORASUWANNARAK *et al.*, 2007a).

Em relação à lignina, houve um aumento considerável de sua concentração após torrefação, por ser uma estrutura tridimensional maior e rígida, sendo que a clivagem de sua estrutura só iniciaria a partir de 300 °C, por isso o teor de lignina foi elevado. Tal fato pode ser explicado quimicamente pela estrutura da lignina que contém ligações de unidades fenólicas com grupos reativos, como as hidroxilas, que facilmente se desidratam liberando grupos funcionais de pequenas moléculas, ainda em menor extensão do que as hemiceluloses (COLLARD; BLIN, 2014; KURODA; NAKAGAWA-IZUMI, 2006).

O teor de cinzas aumentou ligeiramente em condições de 300 °C, devido à perda da massa durante a torrefação causada pela liberação dos compostos orgânicos. Os compostos inorgânicos que formam as cinzas são dificilmente volatilizados, por isso sua concentração aumenta relativamente com a matéria orgânica na biomassa (GONZÁLEZ MARTÍNEZ *et al.*, 2022; WORASUWANNARAK *et al.*, 2007b).

Pela análise composicional, conclui-se que os experimentos de torrefação realizados resultaram em uma biomassa com maior teor de lignina, isso contribui no aumento de seu valor energético, com teor de carbono mais alto representado pelas unidades fenólicas de ligações éter, a DE por unidade de massa aumenta e a biomassa libera mais calor em processos de combustão, onde ligações de carbono são quebradas e convertidas em energia térmica (GONZÁLEZ MARTÍNEZ *et al.*, 2022).

4.3.3 Análise de variância (ANOVA) para o método de Taguchi

A partir dos resultados obtidos na ANOVA avalia-se o fator da matriz experimental com maior significância. Para a análise, segundo a literatura, utiliza-se a soma quadrática dos fatores (SQ), o grau de liberdade (gl), a soma média quadrática (SMQ), a soma quadrática do erro (SQ_{erro}) e o Teste F, no qual termina o nível de significância do parâmetro do experimento. Considerando, 95% (0,05) de confiança com grau de liberdade e grau de liberdade do erro (n-1) igual a 2, o valor do F crítico tabelado $F_{0,05;2;2}$ é 19, para condição “maior é melhor” o valor de F deve ser superior a 19 para que os fatores apresentem significância. Nas Tabela 17, Tabela 18 e Tabela 19 são apresentados os resultados da ANOVA para a média e sinal/ruído das variáveis resposta nas biomassas estudadas.

Tabela 17 - Análise ANOVA para RM

Amostra	Fonte de variação	Média				S/N			
		Soma	gl	SMQ	F	Soma	gl	SMQ	F
CA	SQA	977,965	2	488,98	53,24	12,21	2	6,11	38,94
	SQB	23,399	2	11,700	1,27	0,38	2	0,19	1,23
	SQC	18,370	2	9,180	1,00	0,31	2	0,16	1,00
	SQD	25,952	2	12,980	1,41	0,43	2	0,21	1,37
	SQ (A+B+C+D)	1045,685				13,33			
	SQ erro	0				0			
SE	SQA	1348,688	2	674,34	25,42	19,11	2	9,55	16,86
	SQB	62,352	2	31,18	1,18	1,28	2	0,64	1,13
	SQC	53,054	2	26,53	1,00	1,13	2	0,57	1,00
	SQD	56,609	2	28,30	1,07	1,20	2	0,60	1,06
	SQ (A+B+C+D)	1520,703				22,72			
	SQ erro	0				0			
SB	SQA	2665,078	2	1332,54	47,70	46,77	2	23,39	34,76
	SQB	55,869	2	27,93	1,00	1,35	2	0,67	1,00
	SQC	58,095	2	29,05	1,04	1,39	2	0,69	1,03
	SQD	210,014	2	105,01	3,76	4,77	2	2,38	3,54
	SQ (A+B+C+D)	2989,055				54,27			
	SQ erro	0				0			

Fonte: Autoria própria

Tabela 18 - Análise ANOVA para CF

Amostra	Fonte de variação	Média				S/N			
		Soma	gl	SMQ	F	Soma	gl	SMQ	F
CA	SQA	196,004	2	98,002	637,204	42,172	2	21,086	82,111
	SQB	0,308	2	0,154	1,000	0,514	2	0,257	1,000
	SQC	2,116	2	1,058	6,880	1,004	2	0,502	1,955
	SQD	10,936	2	5,468	35,551	3,528	2	1,764	6,870
	SQ (A+B+C+D)	209,363				47,218			
	SQ erro	0				0			
SE	SQA	225,472	2	112,736	88,552	52,188	2	26,094	4349,001
	SQB	15,375	2	7,688	6,038	2,572	2	1,286	214,334
	SQC	2,546	2	1,273	1,000	0,012	2	0,006	0,996
	SQD	20,710	2	10,355	8,134	3,747	2	1,874	312,258
	SQ (A+B+C+D)	264,103				58,519			
	SQ erro	0				0			
SB	SQA	546,197	2	273,099	216,059	68,028	2	34,014	191,304
	SQB	5,914	2	2,957	2,339	1,348	2	0,674	3,789
	SQC	2,528	2	1,264	1,000	0,532	2	0,266	1,495
	SQD	3,814	2	1,907	1,509	0,356	2	0,178	1,000
	SQ (A+B+C+D)	558,453				70,260			
	SQ erro	0				0			

Fonte: Autoria própria

Tabela 19 - Análise ANOVA para PCS

Amostra	Fonte de variação	Média				S/N			
		Soma	gl	SMQ	F	Soma	gl	SMQ	F
CA	SQA	0,651	2	0,326	155,065	0,189	2	0,094	50,251
	SQB	0,004	2	0,002	1,001	0,004	2	0,002	1,001
	SQC	0,151	2	0,075	35,946	0,039	2	0,020	10,455
	SQD	8,365	2	4,182	1991,565	2,585	2	1,293	687,566
	SQ (A+B+C+D)	9,171				2,817			
	SQ erro	0				0			
SE	SQA	15,495	2	7,747	252,437	3,205	2	1,603	528,877
	SQB	0,910	2	0,455	14,834	0,189	2	0,094	31,166
	SQC	0,061	2	0,031	1,000	0,006	2	0,003	1,000
	SQD	0,467	2	0,234	7,614	0,097	2	0,049	16,052
	SQ (A+B+C+D)	16,934				3,497			
	SQ erro	0				0,000			
SB	SQA	14,450	2	7,225	111,563	2,926	2	1,463	154,016
	SQB	0,361	2	0,181	2,789	0,083	2	0,041	4,355
	SQC	0,130	2	0,065	1,000	0,019	2	0,010	1,003
	SQD	1,232	2	0,616	9,509	0,268	2	0,134	14,077
	SQ (A+B+C+D)	16,172				3,296			
	SQ erro	0				0			

Fonte: Autoria própria

Tabela 20 - Análise ANOVA para MV

Amostra	Fonte de variação	Média				S/N			
		Soma	gl	SMQ	F	Soma	gl	SMQ	F
CA	SQA	473,924	2	236,962	36,087	12,048	2	6,024	15,952
	SQB	13,133	2	6,566	1,000	0,755	2	0,377	1,000
	SQC	16,286	2	8,143	1,240	0,873	2	0,436	1,156
	SQD	194,389	2	97,194	14,802	5,173	2	2,586	6,849
	SQ (A+B+C+D)	697,733				18,850			
	SQ erro	0				0			
SE	SQA	260,715	2	130,357	19,408	3,299	2	1,649	17,760
	SQB	24,349	2	12,174	1,813	0,348	2	0,174	1,875
	SQC	21,518	2	10,759	1,602	0,317	2	0,158	1,707
	SQD	13,433	2	6,716	1,000	0,185	2	0,092	1,001
	SQ (A+B+C+D)	320,017				4,151			
	SQ erro	0				0,000			
SB	SQA	676,808	2	338,40	89,78	14,699	2	7,349	57,735
	SQB	48,144	2	24,072	6,386	0,808	2	0,404	3,176
	SQC	7,538	2	3,769	1,000	0,254	2	0,127	1,000
	SQD	7,932	2	3,966	1,052	0,284	2	0,142	1,116
	SQ (A+B+C+D)	740,42				16,046			
	SQ erro	0				0			

Fonte: Autoria própria

Considerando a análise da ANOVA para o RM e MV (Tabela 17 e Tabela 20), o fator com maior significância para as três biomassas foi a SQA referente a temperatura, visto que F calculado $>$ F crítico. Tal resultado era esperado uma vez que a temperatura é um fator importante para a torrefação, pois influencia na quantidade de umidade e orgânicos voláteis que se desprenderam da biomassa, podendo reduzir o RM e MV (CHEN; KUO, 2011a).

Pela análise da ANOVA para o teor de CF (Tabela 18), os fatores com maior significância foram SQA e SQD, temperatura e a granulometria, para a amostra CA e SQA para SB e SE. O CF é a quantidade de carbono resultante após a queima da biomassa, sendo que a temperatura e a granulometria são fatores importante para definir a densidade de queima, visto que quanto maior a temperatura mais quantidade de hemicelulose e celulose serão liberados da biomassa. Isso faz com que se concentre mais lignina, que por sua vez contém em sua estrutura ligações éter e carbono-carbono mais energéticas do que as ligações carbono-oxigênio ou carbono-

hidrogênio (LEE *et al.*, 2012b).

Para o PCS (Tabela 19) os resultados da ANOVA indicam que os fatores com maior significância foram SQA e SQD, temperatura e a granulometria, para a amostra CA e SQA para as amostras SE e SB, visto que F calculado $> F$ crítico. A granulometria e temperatura são relevantes considerando a medição do PCS, visto que a capacidade de queima da biomassa aumenta ou diminui em relação a sua área superficial, sendo também esses fatores determinantes para uma boa eficiência no processo de queima (ONG *et al.*, 2021; VAN DER STELT *et al.*, 2011).

O resultado da ANOVA para o S/N aponta os fatores externos mais significativos para o experimento. Dentro das condições e variáveis analisadas na torrefação das biomassas, os fatores com F calculado maior que F crítico, foram a temperatura, granulometria e tempo de residência. Tais fatores devem ser bem controlados para minimizar os possíveis erros e garantir a eficiência dos experimentos.

4.4 DELINEAMENTO COMPOSTO CENTRAL ROTACIONAL (DCCR)

A partir dos resultados obtidos pelo método de Taguchi, foram definidos os dois fatores principais: temperatura e tempo de residência, e cinco níveis é utilizado (Tabela 21) para otimizar as três respostas correspondentes a eficiência da torrefação, sendo elas, rendimento em massa (RM%), rendimento energético (RE%) e densidade energética (DE%).

Os níveis usuais aplicados para o DCCR para os pontos fatoriais são $(+1; -1)$. No entanto, foi necessário ajustar esses níveis para $(-0,99; +0,99)$, para a temperatura, e $(-0,94; +0,94)$ para o tempo de residência de forma a obter números inteiros na definição dos valores dos fatores.

Tabela 21 - Fatores e níveis codificados do planejamento experimental do MSR

Fatores	Níveis (codificados)				
	Axial baixo	Baixo	Central	Alto	Axial alto
X ₁ : temperatura (T/°C)	$-\sqrt{2}$	-0,99	0	+0,99	$+\sqrt{2}$
X ₂ : tempo de residência (t/min)	$-\sqrt{2}$	-0,94	0	+0,94	$+\sqrt{2}$

Fonte: Autoria própria

Na Tabela 22 é apresentada a matriz experimental DCCR e os valores das variáveis resposta, RM, RE e DE, obtidos para cada biomassa após realização do planejamento proposto.

Para o cálculo das variáveis foi utilizado as equações (16) (17) e (18).

Tabela 22 - Matriz experimental e respostas do planejamento composto central

EXP	Fatores reais		CA			SE			SB		
	T (°C)	t (min)	RM	RE	DE	RM	RE	DE	RM	RE	DE
1	215	20	92,03	77,55	84,26	94,53	93,57	98,99	89,99	92,51	102,80
2	215	60	90,85	82,67	91,00	89,06	93,51	104,99	88,33	92,27	104,46
3	285	20	82,16	76,77	93,44	82,36	93,32	113,31	51,63	59,67	115,57
4	285	60	73,76	71,23	96,57	72,62	85,48	117,71	18,88	19,32	102,33
5	250	10	91,40	95,73	104,73	91,18	97,91	107,38	88,07	88,83	100,87
6	250	70	81,90	82,60	100,85	79,82	89,20	111,75	75,89	78,86	103,92
7	200	40	92,92	87,90	94,60	90,76	96,59	106,42	90,83	92,96	102,34
8	300	40	55,17	52,38	94,94	61,81	77,33	125,10	23,27	25,89	111,25
9	250	40	82,92	80,57	97,16	85,60	96,62	112,88	81,44	88,14	108,23
10	250	40	85,57	82,19	96,04	86,38	97,89	113,32	81,79	87,66	107,17
11	250	40	85,03	81,41	95,73	83,67	94,97	113,51	82,62	90,29	109,28
12	250	40	85,34	84,51	99,03	84,40	90,86	107,65	78,78	85,05	107,96
13	250	40	87,52	85,48	97,67	84,32	92,12	109,26	82,89	90,54	109,23

Fonte: Autoria própria

Pelos resultados das três variáveis importantes na avaliação da eficiência da torrefação, nota-se na Tabela 22 que o RM e o RE tende a diminuir em função da temperatura. Tal fato é esperado uma vez que o processo de torrefação melhora as características da biomassa, porém se perde energia e massa, à medida que ocorre maior degradação térmica de hemicelulose e liberação de componentes voláteis (LEE *et al.*, 2012b).

O valor de DE acima de 100% indica que a biomassa ganhou mais energia após torrefação, porém como a perda de massa foi grande em temperaturas maiores isso acaba afetando o rendimento. Para uma torrefação com bom rendimento, a temperatura e o tempo de residência devem ser ajustados a fim de que a perda de peso seja superada por um aumento de DE, com isso o importante é tentar minimizar o RM e maximizar o PCS da biomassa (MAMVURA *et al.*, 2018).

4.4.1 Análise do rendimento em massa (RM%)

A Tabela 23 se refere aos resultados da ANOVA do modelo para as biomassas estudadas, sendo os valores de $F = 5,02$ (CA), $F = 8,42$ (SB) e $F = 14,49$ (SE) para variável independente temperatura (X_1) maior que o valor de F tabelado (3,97) e considerando valor- P menor que 0,05, para SB (0,023) e SE (0,007) tem-se que para a variável resposta a temperatura influência significativamente o processo de torrefação.

A variável tempo de residência (X_2) também foi significativa no processo de torrefação, uma vez que $F = 12,73$ (CA), $F = 23,54$ (SE) e $F = 9,39$ (SB) são maiores que F tabelado (3,97) e o resultado do valor- P , CA (0,009), SE (0,002) e SB (0,018), foi menor que 0,05 para as três biomassas.

O coeficiente R^2 mede o quanto as respostas se ajustam ao modelo e o quanto o modelo prevê um bom resultado (SINGH, R. K. *et al.*, 2020b). Os valores do coeficiente para CA, SE e SB foram de 76,49%; 86,36% e 77,84%, tais porcentagens indicam o quanto a variabilidade da variável RM pode ser explicada pelo modelo, devido aos valores mais altos tal resposta apresentou um bom ajuste ao modelo aplicado.

Tabela 23 - Análise ANOVA e regressão para RM

Amostra	Fonte de variação	SQ	gl	SMQ	F	Valor-P	R ² (%)
CA	X ₁	203,48	1	203,48	5,02	0,060	76,49
	X ₂	515,61	1	515,61	12,73	0,009	
	X ₁ ²	17,89	1	17,89	0,44	0,528	
	X ₂ ²	150,96	1	150,96	3,73	0,095	
	X ₁ X ₂	13,02	1	13,02	0,32	0,588	
	Modelo	922,65	5	184,53	4,55	0,036	
	Resíduo	283,62	7				
	Total	1206,27	12				
SE	X ₁	248,915	1	248,915	14,49	0,007	86,36
	X ₂	404,368	1	404,368	23,54	0,002	
	X ₁ ²	8,708	1	8,708	0,51	0,500	
	X ₂ ²	83,664	1	83,664	4,87	0,063	
	X ₁ X ₂	4,569	1	4,569	0,27	0,622	
	Modelo	761,608	5	152,322	8,87	0,006	
	Resíduo	120,24	7				
	Total	881,852	12				
SB	X ₁	1944,12	1	1944,12	8,42	0,023	77,84
	X ₂	2167,90	1	2167,90	9,39	0,018	
	X ₁ ²	25,10	1	25,10	0,11	0,751	
	X ₂ ²	1321,13	1	1321,13	5,72	0,050	
	X ₁ X ₂	241,62	1	241,62	1,05	0,340	
	Modelo	5675,50	5	1135,10	4,92	0,030	
	Resíduo	1615,86	7				
	Total	7291,36	12				

Fonte: Autoria própria

Com base no modelo quadrático, o RM das biomassas torrificadas em fatores codificados foi dada pelas equações (31), (32) e (33).

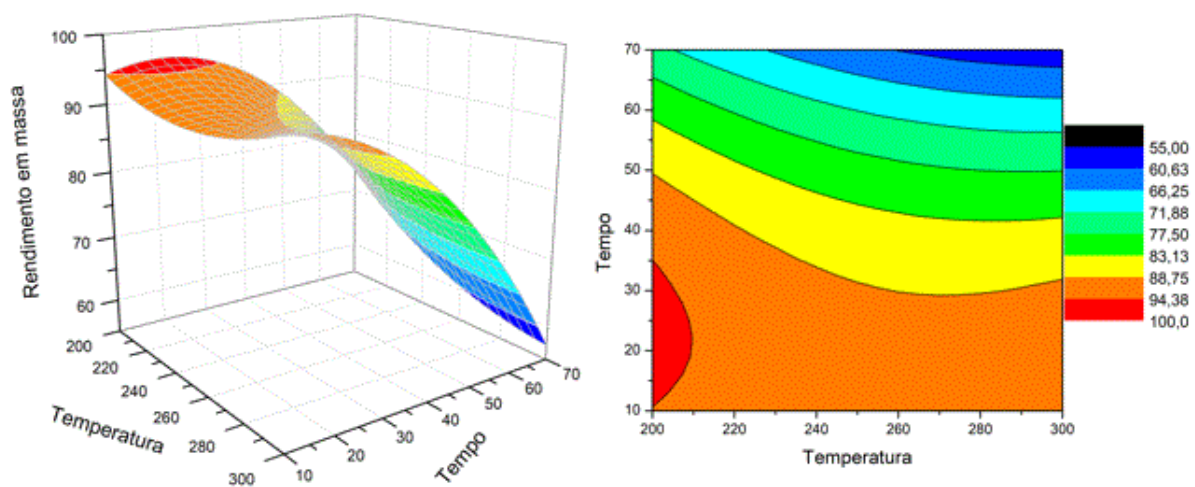
$$y(\text{CA}) = 85,38 - 5,08X_1 - 8,29X_2 + 1,63X_{11} - 4,81X_{22} - 1,94X_{12} \quad (31)$$

$$y(\text{SE}) = 84,96 - 5,61X_1 - 7,34X_2 + 1,13X_{11} - 3,58X_{22} - 1,15X_{12} \quad (32)$$

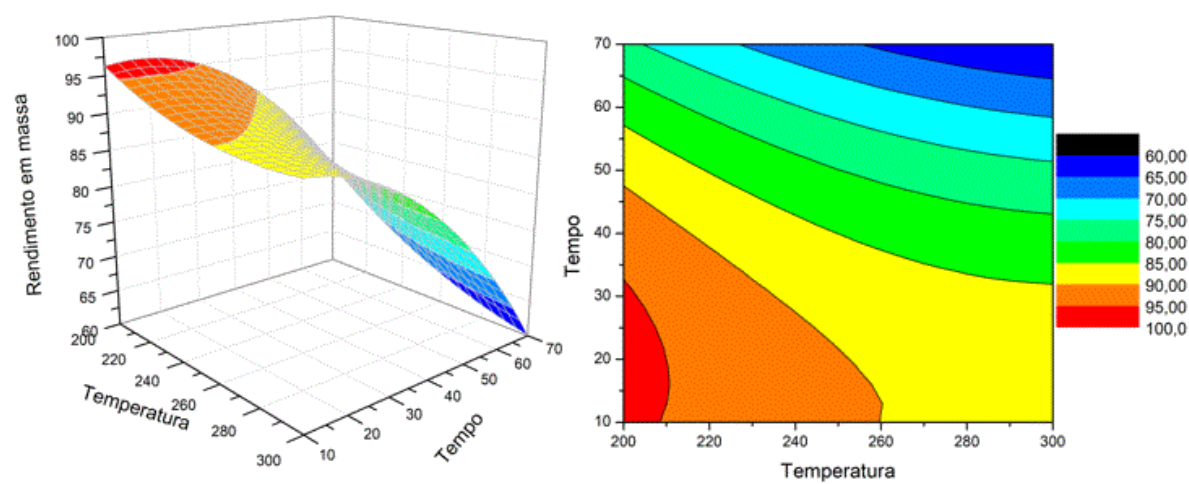
$$y(\text{SB}) = 81,27 - 15,69X_1 - 16,99X_2 + 1,93X_{11} - 14,24X_{22} - 8,35X_{12} \quad (33)$$

A superfícies de resposta e os gráficos de contorno, Figura 22 indicam o efeito interativo e individual dos parâmetros, tempo de residência e temperatura, no RM após torrefação.

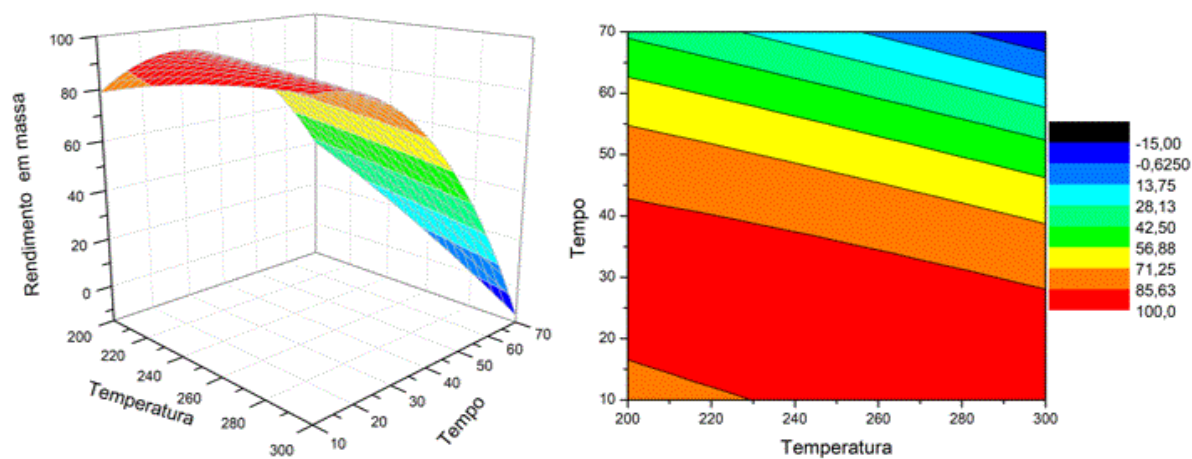
Figura 22 - Superfície de resposta e linhas de contorno para RM: (a) CA, (b) SE e (c) SB



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autoria própria

Analizando as variáveis de forma independente nas Figura 22a-c, a variável tempo apresentou efeito linear com o RM, à medida que aumenta o rendimento decaiu, já com a variável temperatura não houve muita variação.

A fim de avaliar as variáveis independentes na adequação ao modelo em relação às respostas, foi utilizado a ANOVA e análises de regressão. O valor de F indica a influência dos parâmetros durante a torrefação, por isso foi avaliado para cada coeficiente quadrático, considerando o modelo significativo ao nível de confiança de 95% na região estudada e valor do F crítico tabelado $F_{0,05;5;7}$ igual a 3,97 (BARROS NETO *et al.*, 2016b).

Pela análise da ANOVA pode-se comprovar que o tempo de residência e temperatura tiveram efeito linear em relação ao RM nas biomassas, uma vez que (valor $P < 0,05$), porém o impacto da variável tempo foi mais influente para CA, SE e SB (valor $P = 0,009; 0,002, 0,018$; e $F = 12,73; 23,54, 9,39$) do que a temperatura (valor $P = 0,060; 0,007, 0,023$ e $F = 5,02; 14,49, 8,42$).

Os termos quadráticos tiveram menos impacto na resposta, valor-P foi superior à 0,05 indicando que o RM depende mais linearmente das variáveis testadas. Isso pode ser observado também pelo sinal negativo na equação do modelo nos termos.

Por fim, os pontos mais altos da superfície indicam que os melhores rendimentos em massa tanto para a CA e SB foram em temperaturas de 200 °C e tempo intermediário de 40 min, para a SE em 215°C e 20 min.

Os resultados encontrados estão de acordo com estudos anteriores, onde indicam que as variáveis temperatura e tempo apresentam melhor interação em modelo linear para o rendimento da torrefação (BURATTI *et al.*, 2017; SINGH, R. K. *et al.*, 2020c).

4.4.2 Análise do rendimento energético (RE%)

Pela análise da ANOVA, Tabela 24, para o RE das biomassas, a variável independente temperatura (X_1), foi significativa para o SB e SE, uma vez que o valor de $F = 8,28$ (SB) e $F = 4,62$ (SE) foi maior que o valor de F tabelado (3,97), para a CA o valor de $F = 2,47$ foi menor que o tabelado, não se mostrando muito relevante. O valor-P só foi menor que 0,05 para o SB

(0,024), para as demais biomassas o valor foi superior. Sendo assim, a variável temperatura não se mostrou muito significativa nas condições aplicadas para o RE.

A variável tempo de residência (X_2) se mostrou mais relevante para o RE, uma vez que $F = 7,05$ (CA), $F = 13,88$ (SE) e $F = 10,87$ (SB) são maiores que F tabelado (3,97) e o resultado do valor-P, CA (0,033), SE (0,007) e SB (0,013) foi menor que 0,05 para as três biomassas.

O coeficiente R^2 para CA, SE e SB foram de 72,80%; 79,59% e 80,56% os valores foram satisfatórios, indicando um bom ajuste do modelo aos dados experimentais aplicado para o RE.

Tabela 24 - Análise ANOVA e regressão para RE

Amostra	Fonte de variação	SQ	gl	SMQ	F	Valor-P	$R^2(\%)$
CA	X_1	118,66	1	118,65	2,47	0,160	72,80
	X_2	339,14	1	339,14	7,05	0,033	
	X_{12}	38,11	1	38,11	0,79	0,403	
	X_{22}	329,65	1	329,65	6,86	0,034	
	X_1X_2	28,41	1	28,41	0,59	0,467	
	Modelo	900,83	5	180,65	3,75	0,057	
	Resíduo	336,61	7				
	Total	1237,44	12				
SE	X_1	53,00	1	53,00	4,62	0,069	79,59
	X_2	159,208	1	159,208	13,88	0,007	
	X_{12}	0,508	1	0,508	0,04	0,839	
	X_{22}	85,00	1	85,00	7,41	0,030	
	X_1X_2	15,125	1	15,125	1,32	0,288	
	Modelo	312,94	5	62,58	5,46	0,023	
	Resíduo	80,268	7				
	Total	393,21	12				
SB	X_1	1786,91	1	1786,91	8,28	0,024	80,56
	X_2	2344,99	1	2344,99	10,87	0,013	
	X_{12}	113,25	1	113,25	0,52	0,492	
	X_{22}	1706,65	1	1706,65	7,91	0,026	
	X_1X_2	402,15	1	402,15	1,86	0,214	
	Modelo	6257,03	5	1251,41	5,80	0,020	
	Resíduo	1510,36	7				
	Total	7767,39	12				

Fonte: Autoria própria

As equações (34),(35),(36), juntamente com as superfícies de resposta e gráficos de contorno,

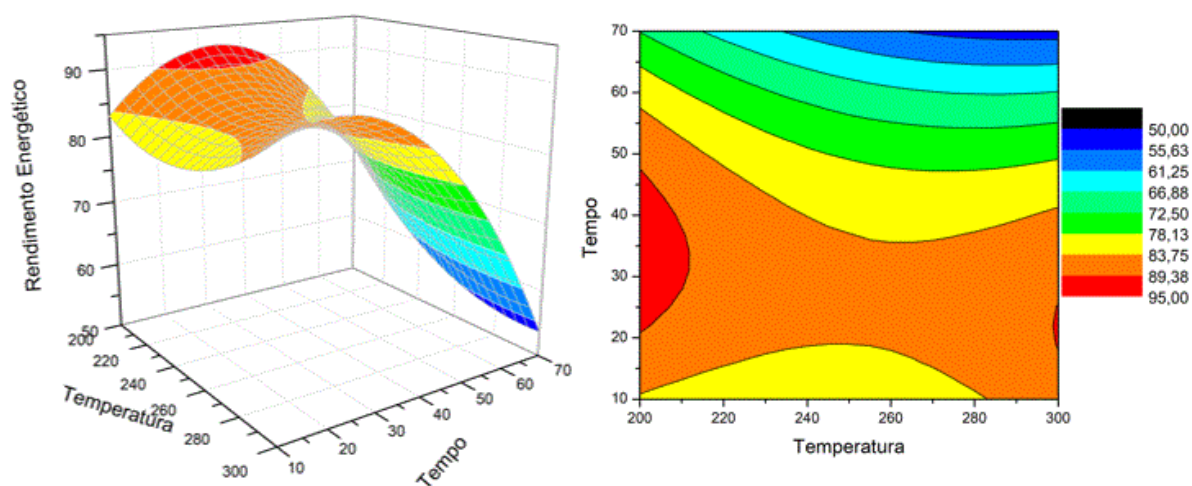
Figura 23, indicam os efeitos das interações dos parâmetros, temperatura e tempo de residência, no RE das biomassas.

$$y(\text{CA}) = 82,75 - 3,88X_1 - 6,72X_2 + 2,37X_{11} - 7,11X_{22} - 2,86X_{12} \quad (34)$$

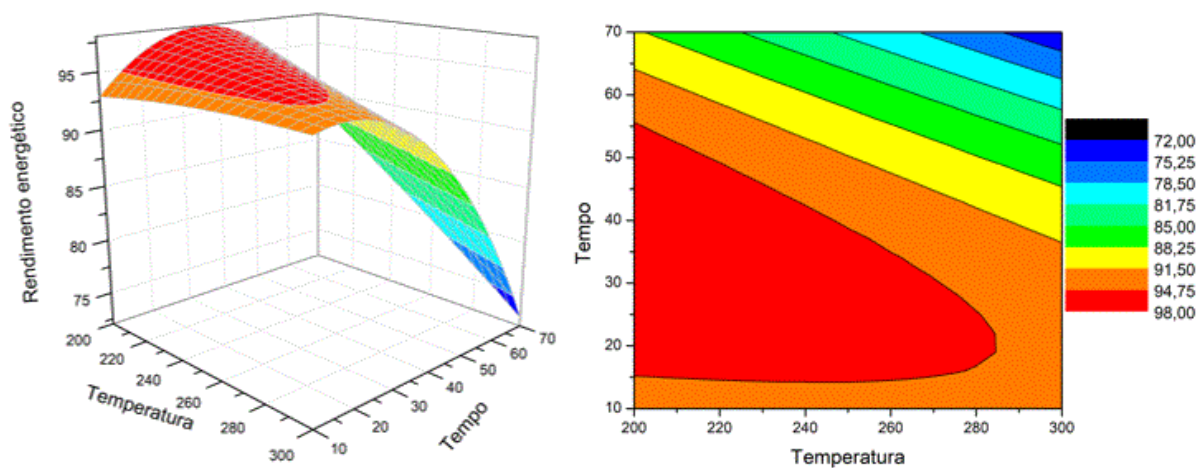
$$y(\text{SE}) = 94,51 - 2,59X_1 - 4,60X_2 - 0,27X_{11} - 3,61X_{22} - 2,09X_{12} \quad (35)$$

$$y(\text{SB}) = 88,14 - 15,04X_1 - 17,67X_2 - 4,09X_{11} - 16,18X_{22} - 10,77X_{12} \quad (36)$$

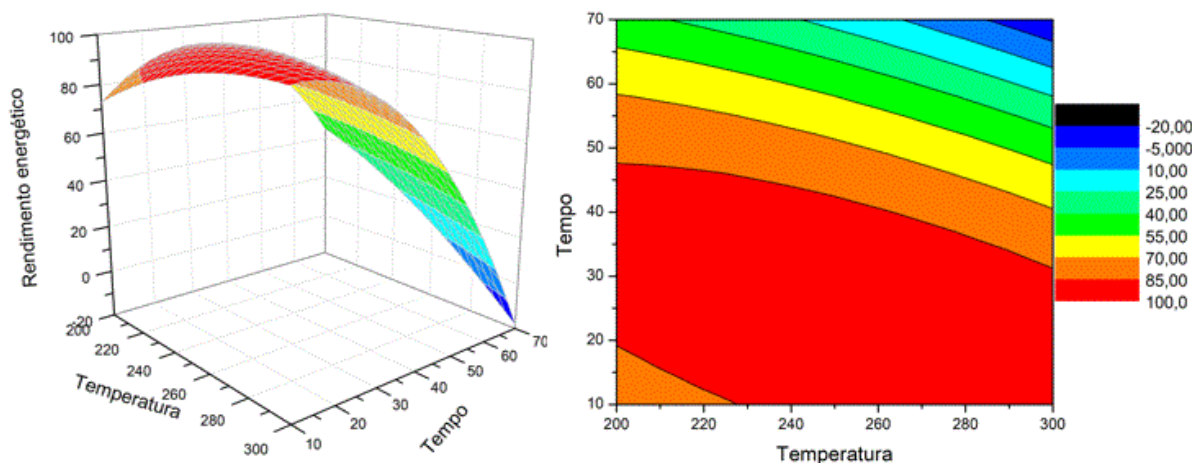
Figura 23 - Superfície de resposta e linhas de contorno para RE: (a) CA, (b) SE e (c) SB



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autoria própria

Assim como nas curvas do RM, o RE decaiu à medida que a variável tempo aumentou, já a variável temperatura não sofreu muita variação.

Tanto no modelo linear como para o quadrático somente o tempo de residência teve influência em relação ao RE das biomassas, sendo o valor $P < 0,05$. O sinal negativo nas equações do modelo indica que os termos não foram tão significativos para o RE.

Observa-se pelas curvas que o RE diminuiu significativamente quando a torrefação avançou para temperaturas maiores, tal decaimento é semelhante a resultados de outros estudos de torrefação de biomassa (ARIAS *et al.*, 2008b; MARTÍN-LARA *et al.*, 2017b).

Os pontos mais altos da superfície indicam que os melhores rendimentos energéticos para a CA e SE foram em temperaturas de 250 °C e tempo 10 min, para o SB em 200 °C e 40 min.

4.4.3 Análise da densidade energética (DE%)

Conforme mostrado na Tabela 25, os termos independentes e quadráticos para a CA e SB não foram significantes ao modelo para as condições realizadas, os valores de F foram menores que o valor F tabelado (3,97) e o valor-P maior que 0,05. Com base no valor do coeficiente R^2 para CA (33,03%) e SB (60,13%) verifica-se que as respostas não se ajustaram ao modelo, uma vez que as porcentagens foram baixas.

No entanto, a biomassa, serragem, apresentou bom ajuste com o modelo, os termos

independentes X_1 e X_2 , se mostraram significantes, com valores $F = 6,84$ e $8,65$ maiores que F tabelado (3,97) e valor- $P = 0,035$ e $0,022$, menor que $0,05$. O mesmo não ocorreu para os termos quadráticos.

Tabela 25 - Análise ANOVA e regressão para DE

Amostra	Fonte de variação	SQ	GL	SMQ	F	Valor-P	R ² (%)
CA	X_1	10,54	1	10,54	0,39	0,554	33,03
	X_2	12,69	1	12,69	0,46	0,517	
	X_{12}	6,26	1	6,26	0,23	0,647	
	X_{22}	53,93	1	53,93	1,97	0,203	
	X_1X_2	3,24	1	3,24	0,12	0,741	
	Modelo	94,36	5	18,87	0,69	0,647	
	Resíduo	191,36	7				
	Total	285,73	12				
SE	X_1	137,42	1	137,42	6,84	0,035	71,54
	X_2	173,77	1	173,77	8,65	0,022	
	X_{12}	22,00	1	22,00	1,10	0,330	
	X_{22}	12,90	1	12,90	0,64	0,449	
	X_1X_2	0,64	1	0,64	0,03	0,863	
	Modelo	353,24	5	70,64	3,52	0,066	
	Resíduo	140,54	7				
	Total	493,79	12				
SB	X_1	27,86	1	27,86	2,26	0,176	60,13
	X_2	0,379	1	0,379	0,03	0,866	
	X_{12}	46,42	1	46,42	3,77	0,093	
	X_{22}	1,27	1	1,27	0,10	0,757	
	X_1X_2	55,49	1	55,49	4,50	0,072	
	Modelo	130,17	5	26,03	2,11	0,179	
	Resíduo	86,29	7				
	Total	216,46	12				

Fonte: Autoria própria

As equações (37)(38)(39), juntamente com as superfícies de resposta e gráficos de contorno,

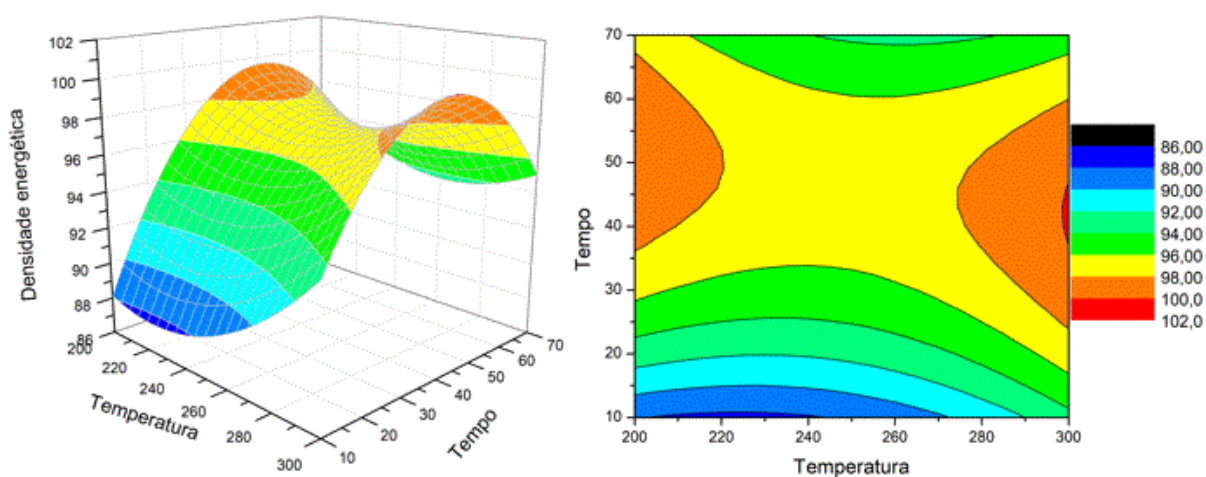
Figura 24, indicam os efeitos das interações dos parâmetros, temperatura e tempo de residência, na DE das biomassas.

$$y(\text{CA}) = 96,93 + 1,16X_1 + 1,30X_2 + 0,96X_{11} - 2,88X_{22} - 0,97X_{12} \quad (37)$$

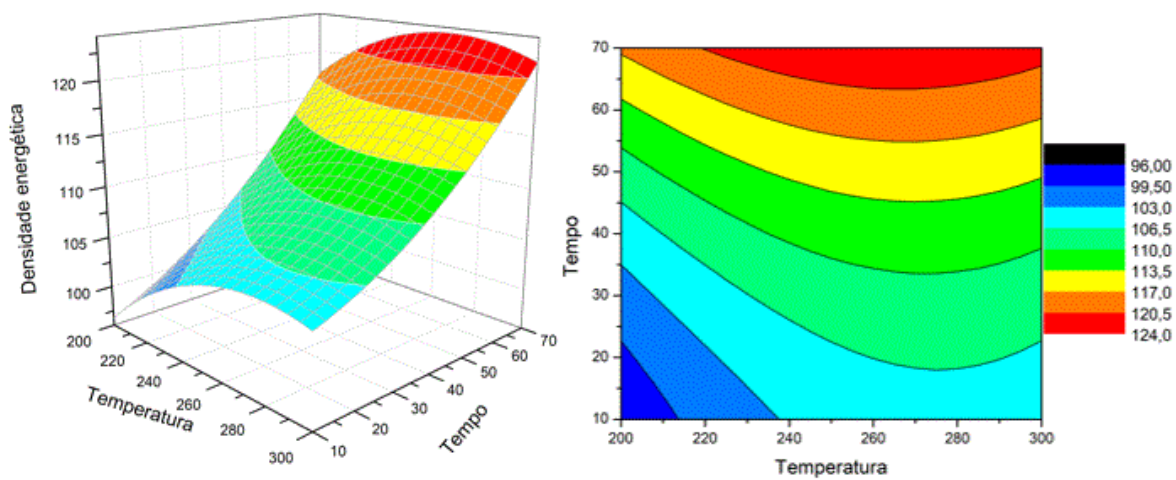
$$y(\text{SE}) = 111,23 + 4,17X_1 + 4,81X_2 - 1,80X_{11} + 1,41X_{22} - 0,43X_{12} \quad (38)$$

$$y(\text{SB}) = 108,42 + 1,88X_1 + 0,22X_2 - 2,62X_{11} - 0,44X_{22} - 4,00X_{12} \quad (39)$$

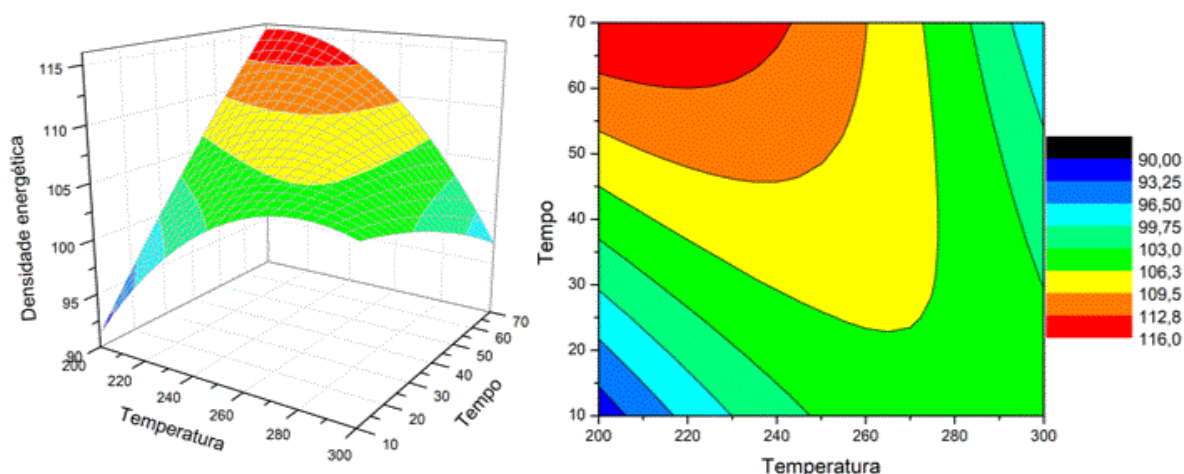
Figura 24 - Superfície de resposta e linhas de contorno para DE: (a) CA, (b) SE e (c) SB



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autoria própria

Apesar do modelo não ter bons resultados lineares em relação às condições testadas, pelos gráficos de contorno observa-se que os pontos mais altos da superfície para a CA foi na temperatura de 250 °C e 10 min, para SB à 285 °C e 20 min e SE a 300 °C e 40 min. Em temperaturas acima de 250 °C a torrefação começa a ser mais severa, com isso perde-se umidade e concentra-se os compostos orgânicos mais densos que aumentam a DE da biomassa e consecutivamente seu poder calorífico.

Sendo assim, após as análises dos modelos e gráficos das condições experimentais testadas, foi possível notar que o RM e RE são lineares relativamente ao tempo e inversamente proporcional a DE quanto a temperatura, à medida que a torrefação avançou para temperaturas maiores os rendimentos caíram e a densidade aumentou.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo alcançou o objetivo de realizar o pré-tratamento de torrefação em biomassas de casca de arroz, serragem e sorgo biomassa, utilizando o planejamento de Taguchi. Foram testadas diversas combinações experimentais por meio do arranjo ortogonal L9, com 4 fatores em 3 níveis, sendo eles, temperatura (200, 250 e 300 °C), tempo de residência (30, 40 e 50 minutos), massa da amostra (1, 3 e 5 g) e granulometria média (83, 251 e 550 μm). Além disso, foi realizada a caracterização das biomassas tanto *in natura* quanto após torrefação, com o intuito de identificar melhorias nas propriedades como biocombustível.

Os resultados obtidos a partir do planejamento de Taguchi indicaram que a temperatura foi o fator de maior influência no pré-tratamento das três biomassas. As melhores condições experimentais para maximizar as variáveis resposta carbono fixo e poder calorífico ocorreram nos níveis mais elevados de temperatura e tempo, ou seja, 300 °C por 50 min. Por outro lado, para otimizar as variáveis de rendimento mássico e material volátil, as condições mais brandas, 200 °C por 30 min, foram consideradas ideais.

A verificação da eficiência da torrefação, por meio do DCCR, confirmou que maiores rendimentos em massa e energia são alcançados e condições mais brandas de torrefação. Para a CA e SB, as melhores condições para aumentar o rendimento em massa foram 200 °C por 40 minutos; já para a serragem de eucalipto (SE), a condição ideal foi 215 °C por 20 minutos. Em relação ao rendimento energético, os melhores resultados foram obtidos com torrefação a 250 °C por 10 minutos para a CA e SE, e 200 °C por 40 minutos para a SB. Para maximizar a densidade energética, no entanto, foram necessárias condições mais severas de torrefação: 250 °C por 10 minutos para a CA, 285 °C por 20 minutos para a SB, e 300 °C por 40 minutos para a SE.

Nas análises de caracterização físicas e químicas, observou-se mudanças visuais significativas, redução na umidade e nos compostos voláteis, e aumento nas frações de carbono fixo e poder calorífico após torrefação das biomassas. A análise elementar revelou biomassas com menores porcentagens de hidrogênio e oxigênio, mas com maior teor de carbono.

Ao comparar a composição lignocelulósica antes e depois da torrefação, foram observadas alterações nas estruturas químicas das biomassas, como uma redução nas concentrações de hemicelulose e celulose, enquanto a lignina, mais resistente à torrefação,

mantteve-se em maior proporção. Essas modificações também foram confirmadas por espectroscopia de infravermelho, que indicou variações na intensidade e desaparecimento de bandas, sugerindo mudanças estruturais nas ligações químicas. Além de modificações químicas, a morfologia das amostras após torrefação revelou a formação de microporos e maior fragmentação.

Concluindo, pode-se afirmar que a qualidade das biomassas estudadas foi significativamente aprimorada após o tratamento de torrefação conforme demonstrado pelas análises de caracterização, que revelaram melhorias nas propriedades físico-químicas em comparação com a biomassa original.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, A. *et al.* Sugarcane straw as a potential second generation feedstock for biorefinery and white biotechnology applications. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 144, p. 105896, 2021.
- ALMEIDA, L. G. F. *et al.* Composition and growth of sorghum biomass genotypes for ethanol production. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 122, p. 343–348, 2019.
- ANCA-COUCÉ, A. Reaction mechanisms and multi-scale modelling of lignocellulosic biomass pyrolysis. **Progress in Energy and Combustion Science**, Oxford, v. 53, p. 41–79, 2016.
- ANIZA, R. *et al.* Integrating Taguchi method and artificial neural network for predicting and maximizing biofuel production via torrefaction and pyrolysis. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 343, p. 126140, 2022.
- ARAUJO, E. S.; FERREIRA, T. M. A.; FERREIRA, A. S. Porque investir na ampliação de produção de biomassa. **Revista FeT**, Curitiba, 2022. Disponível em: <https://revistaft.com.br/fonte-de-energia-com-uso-de-biomassa-construcao-de-uma-visao-educacional-e-sustentavel/>. Acesso em: 11 set. 2022.
- ARIAS, B. *et al.* Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass. **Fuel Processing Technology**, Amsterdam, v. 89, n. 2, p. 169–175, 2008a.
- ARPIA, A. *et al.* Catalytic microwave-assisted torrefaction of sugarcane bagasse with calcium oxide optimized via Taguchi approach: Product characterization and energy analysis. **Fuel**, Guildford, v. 305, p. 121543, 2021.
- ASADULLAH, M. *et al.* Optimization of palm kernel shell torrefaction to produce energy densified bio-coal. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 88, p. 1086–1093, 2014.
- BABINSZKI, B. *et al.* Comparison of hydrothermal carbonization and torrefaction of azolla biomass: Analysis of the solid products. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Amsterdam, v. 149, p. 104844, 2020.
- BACH, Q. V.; SKREIBERG, O. Upgrading biomass fuels via wet torrefaction: A review and comparison with dry torrefaction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 54, p. 665–677, 2016.
- BALAT, M.; BALAT, H.; ÖZ, C. Progress in bioethanol processing. **Progress in Energy and Combustion Science**, Oxford, v. 34, n. 5, p. 551–573, 2008.
- BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos**. 2. ed. São Paulo: Editora Unicamp, 2016.

BARSKOV, S. *et al.* Torrefaction of biomass: A review of production methods for biocoal from cultured and waste lignocellulosic feedstocks. **Renewable Energy**, Algiers, v. 142, p. 624–642, 2019.

BARZEGAR, R. *et al.* TGA and kinetic study of different torrefaction conditions of wood biomass under air and oxy-fuel combustion atmospheres. **Journal of the Energy Institute**, London, v. 93, n. 3, p. 889–898, 2020.

BIOMASSA, A. B.I. **Potencial de biomassa de resíduos agroindustriais no Brasil**. Curitiba: ABIB, 2022. Disponível em: <https://www.agrimidia.com.br/negocios/economia/potencial-de-biomassa-de-residuos-agroindustriais-no-brasil/>. Acesso em: 31 out. 2022.

BORGES, M. S. **Avaliação da biomassa residual produzida no Cerrado Tocantinense como potencial biomassa bruta para biorrefinaria**. Orientador: Elisandra Scapin. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente) – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2020.

BRACHI, P. *et al.* Mass and energy balances for a stand- alone tomato peels torrefaction. *In: MEETING OF THE ITALIAN SECTION OF THE COMBUSTION INSTITUTE*, 39., p. 18.1 - 18.6, 2016, Nápoles. **Proceedings** [...]. Nápoles: ASICI, 2016. Disponível em: <https://www.combustion-institute.it/proceedings/XXXIX-ASICI/papers/39proci2016.I8.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2025.

BRACHI, P. *et al.* Fluidized bed torrefaction of biomass pellets: A comparison between oxidative and inert atmosphere. **Powder Technology**, Amsterdam, v. 357, p. 97-107, 2019.

BUI, H. T. *et al.* Impact of a resistance training program on ataxia as measured by an innovative computer-based test. **Medicine and Science in Sports & Exercise**, Philadelphia, v. 47, n. 5S, p. 362, 2015.

BURATTI, C. *et al.* Optimization of torrefaction conditions of coffee industry residues using desirability function approach. **Energy Procedia**, Amsterdam, v. 126, p. 136–143, 2017.

CANDELIER, K. *et al.* Utilization of thermodesorption coupled to GC–MS to study stability of different wood species to thermodegradation. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Amsterdam, v. 92, n. 2, p. 376–383, 2011.

CARDONA, S. *et al.* Torrefaction of eucalyptus-tree residues: A new method for energy and mass balances of the process with the best torrefaction conditions. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, Amsterdam, v. 31, p. 17–24, 2019.

CARVAJAL, J. C.; GÓMEZ, Á.; CARDONA, C. A. Comparison of lignin extraction processes: Economic and environmental assessment. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 214, p. 468–476, 2016.

CHEN, W. H. *et al.* Comprehensive review of thermoelectric generation optimization by statistical approach: Taguchi method, analysis of variance (ANOVA), and response surface methodology (RSM). **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 169, p. 112917, 2022.

CHEN, D. *et al.* Upgrading rice husk via oxidative torrefaction: Characterization of solid, liquid, gaseous products and a comparison with non-oxidative torrefaction. **Fuel**, Guildford, v. 275, p. 117936, 2020.

CHEN, D. *et al.* In-depth study of rice husk torrefaction: Characterization of solid, liquid and gaseous products, oxygen migration and energy yield. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 253, p. 148–153, 2018.

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

CHEN, W. H.; KUO, P. C. Torrefaction and co-torrefaction characterization of hemicellulose, cellulose and lignin as well as torrefaction of some basic constituents in biomass. **Energy**, Oxford, v. 36, n. 2, p. 803–811, 2011.

CHEN, W. H. *et al.* Progress in biomass torrefaction: Principles, applications and challenges. **Progress in Energy and Combustion Science**, Oxford, v. 82, 2021.

CHEN, W. H. *et al.* Non-oxidative and oxidative torrefaction characterization and SEM observations of fibrous and ligneous biomass. **Applied Energy**, London, v. 114, p. 104–113, 2014.

CHEN, W. H. *et al.* Biomass torrefaction characteristics in inert and oxidative atmospheres at various superficial velocities. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 146, p. 152–160, 2013.

CHEN, W. H.; LU, K. M.; TSAI, C. M. An experimental analysis on property and structure variations of agricultural wastes undergoing torrefaction. **Applied Energy**, London, v. 100, p. 318–325, 2012a.

CHEN, C. *et al.* Rice husk and rice straw torrefaction: Properties and pyrolysis kinetics of raw and torrefied biomass. **Environmental Technology and Innovation**, London, v. 24, p. 101872, 2021.

CHEN, W. H. *et al.* Effect of torrefaction pretreatment on the pyrolysis of rubber wood sawdust analyzed by Py-GC/MS. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 259, p. 469–473, 2018.

CHUNGSANGUNSIT, T. *et al.* Environmental Profile of Power Generation from Rice Husk in Thailand. In: THE JOINT INTERNATIONAL CONFERENCE ON “SUSTAINABLE ENERGY AND ENVIRONMENT (SEE), 1., 2004, Hua Hin. **Proceedings [...]**. Hua Hin: Thailand, v.024, n. December, p. 739–742, 2004.

COLLARD, F. X.; BLIN, J. A review on pyrolysis of biomass constituents: Mechanisms and composition of the products obtained from the conversion of cellulose, hemicelluloses and lignin. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 38, p. 594–608, 2014.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Conab - Safra 2022/23: Produção de grãos pode chegar a 308 milhões de t** impulsionada pela boa rentabilidade de milho, soja e algodão. Brasília: CONAB, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/assuntos/noticias/safra-2022-23-producao-de-graos-pode-chegar-a-308-milhoes-de-t-impulsionada-pela-boia-rentabilidade-de-milho-soja-e-algodao>. Acesso em: 10 nov. 2022.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Conab - Último levantamento da safra 2023/2024 estima produção de grãos em 298,41 milhões de toneladas**. Brasília: CONAB, 2024. Disponível em: <https://antigo.conab.gov.br/ultimas-noticias/5728-ultimo-levantamento-da-safra-2023-2024-estima-producao-de-graos-em-298-41-milhoes-de-toneladas>. Acesso em: 26 dez. 2024.

CONAG, A. T. *et al.* Energy densification of sugarcane bagasse through torrefaction under minimized oxidative atmosphere. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, Amsterdam, v. 5, n. 6, p. 5411–5419, 2017.

CONAG, A. T. *et al.* Energy densification of sugarcane leaves through torrefaction under minimized oxidative atmosphere. **Energy for Sustainable Development**, Amsterdam, v. 42, p. 160–169, 2018.

DA SILVA, C. M. S. *et al.* Biomass torrefaction for energy purposes – Definitions and an overview of challenges and opportunities in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 82, p. 2426–2432, 2018.

DESHAVATH, N. N. *et al.* Chemical composition analysis of various genetically modified sorghum traits: Pretreatment process optimization and bioethanol production from hemicellulosic hydrolyzates without detoxification. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, Amsterdam, v. 6, n. 4, p. 5625–5634, 2018.

DODDAPANENI, T. R. K. C. *et al.* Techno-economic evaluation of integrating torrefaction with anaerobic digestion. **Applied Energy**, London, v. 213, p. 272–284, 2018.

DOS SANTOS, B. V. *et al.* Biomass sorghum: effect of acid, basic and alkaline peroxide pretreatments on the enzymatic hydrolysis and ethanol production. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 64, p. 1–10, 2021.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Eucalipto - Portal Embrapa**. Brasília: Embrapa, 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br/florestas/eucalipto>. Acesso em: 13 out. 2022.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Eucalipto é capaz de armazenar grandes quantidades de carbono**. Portal Embrapa. Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/87022164/eucalipto-e-capaz-de-armazenar-grandes-quantidades-de-carbono>. Acesso em: 26 dez. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional destaca crescimento da oferta de energia na matriz brasileira e aumento da renovabilidade**. Agência Gov. Brasília: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/balanco-energetico-nacional-destaca-crescimento-da-oferta-de-energia-na-matriz-brasileira-e-aumento-da-renovabilidade>. Acesso em: 26 dez. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2023**: Ano base 2022. Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf>. Acesso em: 26 dez. 2024.

GALINA, N. R. *et al.* Comparative study on combustion and oxy-fuel combustion environments using mixtures of coal with sugarcane bagasse and biomass sorghum bagasse by the thermogravimetric analysis. **Journal of the Energy Institute**, London, v. 92, n. 3, p. 741–754, 2019.

GONG, S. H. *et al.* Enhancement of waste biomass fuel properties by sequential leaching and wet torrefaction. **Fuel**, Guildford, v. 239, p. 693–700, 2019.

GONZÁLEZ MARTÍNEZ, M. *et al.* Biomass in TGA-GC/MS: Linking production profiles of volatile species to biomass type and macromolecular composition. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 176, n. December 2021, 2022.

GRUPO DE PESQUISA EM BIOENERGIA. **Saiba mais sobre Biomassa**. São Paulo: Universidade de São Paulo, Instituto de energia e ambiente, 2009. Disponível em: <https://gbio.webhostusp.sti.usp.br/?q=pt-br/livro/saiba-mais-sobre-biomassa>. Acesso em: 17 jun. 2025.

GUEDES, J. M.; SANTOS, A. G. D.; SANTOS, H. S. Uso da biomassa como fonte energética para produção de biocombustíveis. **Ambiente: Gestão e Desenvolvimento**, São Paulo, v. 1, n. 1, 2021.

HE, Q. *et al.* Effect of torrefaction on pinewood pyrolysis kinetics and thermal behavior using thermogravimetric analysis. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 280, p. 104–111, 2019.

HU, J. *et al.* Combustions of torrefaction-pretreated bamboo forest residues: Physicochemical properties, evolved gases, and kinetic mechanisms. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 304, p. 122960, 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cultivo do sorgo no Brasil teve um aumento de 22,3%**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://sba1.com/noticias/noticia/26926/Cultivo-do-sorgo-no-Brasil-teve-um-aumento-de-22-3->. Acesso em: 26 dez. 2024.

INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE. **Atlas de Eficiência Energética do Brasil 2022**. São Paulo: IEA, 2022. https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-741/Atlas_Eficiencia_Energetica_Brasil_2022.pdf. Acesso em: 17 jun. 2025.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Mapeamento e caracterização dos plantios florestais do Brasil**. Relatório Anual do IBÁ. Brasília: IBÁ, 2023. Disponível em: <https://iba.org/relatorio2024.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2025.

INDÚSTRIA DE TELECOMUNICAÇÃO ELETRÔNICA BRASILEIRA. **Energia limpa no Brasil**. Santa Catarina, 2021. Disponível em: <https://blog.intelbras.com.br/energia-limpa/>. Acesso em: 11 set. 2022.

IVANOVSKI, M. *et al.* Determination of the kinetics and thermodynamic parameters of lignocellulosic biomass subjected to the torrefaction process. **Materials**, Basel, v. 14, n. 24, 2021.

JESÚS RANGEL, M. *et al.* Hydrothermal treatment of eucalyptus sawdust for a forest biorefinery. **Cellulose Chemistry and Technology**, Bucareste, v. 50, n. 5–6, p. 521–528, 2016.

JUNG, S. J.; KIM, S. H.; CHUNG, I. M. Comparison of lignin, cellulose, and hemicellulose contents for biofuels utilization among 4 types of lignocellulosic crops. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 83, p. 322–327, 2015.

KAI, X. *et al.* Effect of torrefaction on rice straw physicochemical characteristics and particulate matter emission behavior during combustion. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 278, p. 1–8, 2019.

KAN, T.; STREZOV, V.; EVANS, T. J. Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 57, p. 1126–1140, 2016.

KARATEPE, N.; KÜÇÜKBAYRAK, S. Proximate analysis of some turkish lignites by thermogravimetry. **Thermochimica Acta**, Amsterdam, v. 213, n. C, p. 147–150, 1993.

KONGTO, P. *et al.* Intensive exploration of the fuel characteristics of biomass and biochar from oil palm trunk and oil palm fronds for supporting increasing demand of solid biofuels in Thailand. **Energy Reports**, Amsterdam, v. 8, p. 5640–5652, 2022.

KURODA, K.I.; NAKAGAWA-IZUMI, A. Analytical pyrolysis of lignin: Products stemming from β -5 substructures. **Organic Geochemistry**, Oxford, v. 37, n. 6, p. 665–673, 2006.

LE RAVALEC, M.; RAMBAUD, A.; BLUM, V. Taking climate change seriously: Time to credibly communicate on corporate climate performance. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 200, p. 107542, 2022.

LEE, J. W. *et al.* Optimizing the torrefaction of mixed softwood by response surface methodology for biomass upgrading to high energy density. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 116, p. 471–476, 2012.

LI, S. X. *et al.* Torrefaction of corncob to produce charcoal under nitrogen and carbon dioxide atmospheres. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 249, p. 348–353, 2018.

LIU, C. F. *et al.* Physicochemical characterization of cellulose from perennial ryegrass leaves (*Lolium perenne*). **Carbohydrate Research**, Amsterdam, v. 341, n. 16, p. 2677–2687, 2006.

LORENZETT, D. B.; NEUHAUS, M.; SCHWAB, N. T. Gestão de resíduos e a indústria de beneficiamento de arroz. **Revista Gestão Industrial**, Ponta Grossa, v. 8, n. 1, 2012.

- LU, K. M. *et al.* Torrefaction and low temperature carbonization of oil palm fiber and eucalyptus in nitrogen and air atmospheres. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 123, p. 98–105, 2012.
- MAGDZIARZ, A.; WILK, M.; STRAKA, R. Combustion process of torrefied wood biomass: A kinetic study. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, Budapest, v. 127, n. 2, p. 1339–1349, 2017.
- MAMVURA, T. A.; PAHLA, G.; MUZENDA, E. Torrefaction of waste biomass for application in energy production in South Africa. **South African Journal of Chemical Engineering**, United Kingdom, v. 25, p. 1–12, 2018.
- MANATURA, K. Inert torrefaction of sugarcane bagasse to improve its fuel properties. **Case Studies in Thermal Engineering**, Amsterdam, v. 19, p. 100623, 2020.
- MARCONCINI, J. M. **Termogravimetria de casca de arroz**. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2007. (Comunicado Técnico, 89). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/29537/1/CT892007.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2025.
- MARTÍN-LARA, M. A. *et al.* Torrefaction of olive tree pruning: effect of operating conditions on solid product properties. **Fuel**, Guildford, v. 202, p. 109–117, 2017.
- MAY, Eng.-Agrôn. *et al.* **Sorgo Biomassa para a Cogeração de Energia: Introdução**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2015. (Circular Técnica, 211). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1035091/1/circ211.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2025.
- MELKIOR, T.; BARTHOMEUF, C.; BARDET, M. Inputs of solid-state NMR to evaluate and compare thermal reactivity of pine and beech woods under torrefaction conditions and modified atmosphere. **Fuel**, Guildford, v. 187, p. 250–260, 2017.
- MUNDIKE, J.; COLLARD, F. X.; GÖRGENS, J. F. Torrefaction of invasive alien plants: Influence of heating rate and other conversion parameters on mass yield and higher heating value. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 209, p. 90–99, 2016.
- NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Brasília, 2020. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 31 out. 2022.
- NIU, Y. *et al.* Biomass torrefaction: properties, applications, challenges, and economy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 115, n. November 2018, p. 109395, 2019.
- NOGUEIRA, L. A. H. **Bioenergias e Sustentabilidade: nexos e métodos**. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2005. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/272814762_Bioenergias_e_Sustentabilidade_nexos_e_metodos. Acesso em 17 jun. 2025.

ONG, H. C. *et al.* Variation of lignocellulosic biomass structure from torrefaction: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 152, p. 111698, 2021.

PATEL, M.; ZHANG, X.; KUMAR, A. Techno-economic and life cycle assessment on lignocellulosic biomass thermochemical conversion technologies: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 53, p. 1486–1499, 2016.

PERIYASAMY, S. *et al.* Recent advances in consolidated bioprocessing for conversion of lignocellulosic biomass into bioethanol: A review. **Chemical Engineering Journal**, Lausanne, v. 453, p. 1385–8947, 2023.

RAJASEKHAR REDDY, B.; VINU, R. Microwave-assisted co-pyrolysis of high ash Indian coal and rice husk: Product characterization and evidence of interactions. **Fuel Processing Technology**, Amsterdam, v. 178, n. April, p. 41–52, 2018.

RAMBO, M. K. D.; SCHMIDT, F. L.; FERREIRA, M. M. C. Analysis of the lignocellulosic components of biomass residues for biorefinery opportunities. **Talanta**, London, v. 144, p. 696–703, 2015.

RICCIULLI, M. **Aplicação da análise termogravimétrica na avaliação da interação entre os componentes do bagaço e da palha de cana-de-açúcar**. Orientador: Ivonete Ávila. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, p. 1–23, 2016.

RICCIULLI, M. O. *et al.* Interaction among lignocellulosic biomass components in thermochemical processes. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 182, n. May 2023, 2024.

RIVERA, D. R. T. *et al.* An energy analysis on the production of torrefied microalgal biomass. **Earth and Environmental Science**, Bristol, v. 463, n. 1, 2020.

RIVERA, D. R. T. *et al.* Energy balance of torrefied microalgal biomass with production upscale approached by life cycle assessment. **Journal of environmental management**, Oxford, v. 294, 2021.

SALANTI, A. *et al.* Structural characterization and antioxidant activity evaluation of lignins from rice husk. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 58, n. 18, p. 10049–10055, 2010.

SHELLER, H. V.; ULVSKOV, P. Hemicelluloses. *In: ANNUAL REVIEW OF PLANT BIOLOGY*, 61, p. 263–289, 2010, Palo Alto. **Proceedings** [...]. Palo Alto: Annual reviews, 2010. Disponível em: <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-arplant-042809-112315>. Acesso em: 05 nov. 2023.

SHAH, A. *et al.* Techno-economic analysis of a production-scale torrefaction system for cellulosic biomass upgrading. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, Chichester, v. 6, n. 1, p. 45–57, 2012.

SILVA, R. L. *et al.* Experimental investigation on eucalyptus sawdust torrefaction for energy properties upgrading. **Scientia Forestalis**, Piracicaba: Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, v. 48, n. 125, p. 1–11, 2020.

SINGH, S.; CHAKRABORTY, J. P.; MONDAL, M. K. Optimization of process parameters for torrefaction of *Acacia nilotica* using response surface methodology and characteristics of torrefied biomass as upgraded fuel. **Energy**, Oxford, v. 186, p. 115865, 2019.

SINGH, S.; CHAKRABORTY, J. P.; MONDAL, M. K. Torrefaction of woody biomass (*Acacia nilotica*): Investigation of fuel and flow properties to study its suitability as a good quality solid fuel. **Renewable Energy**, Algiers, v. 153, p. 711–724, 2020.

SINGH, R. K.; CHAKRABORTY, J. P.; SARKAR, A. Optimizing the torrefaction of pigeon pea stalk (*Cajanus cajan*) using response surface methodology (RSM) and characterization of solid, liquid and gaseous products. **Renewable Energy**, Algiers v. 155, p. 677–690, 2020.

SINGH, R. K.; SARKAR, A.; CHAKRABORTY, J. P. Effect of torrefaction on the physicochemical properties of pigeon pea stalk (*Cajanus cajan*) and estimation of kinetic parameters. **Renewable Energy**, Algiers, v. 138, p. 805–819, 2019.

SLUITER, A. *et al.* Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass: Laboratory Analytical Procedure. **National Renewable Energy Laboratory**, Golden, 2008.

STOFFEL, R. B. *et al.* C. Hemicellulose extraction from slash pine sawdust by steam explosion with sulfuric acid. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 107, n. October 2016, p. 93–101, 2017.

TAVARES, D. *et al.* Lignin from residual sawdust of eucalyptus spp. Isolation, characterization, and evaluation of the antioxidant properties. **Biomass**, Basel, v. 2, n. 3, p. 195–208, 2022.

TIAN, X. *et al.* Influence of torrefaction pretreatment on corncobs: A study on fundamental characteristics, thermal behavior, and kinetic. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 297, p. 122490, 2020.

TURRIONI, J. B.; MELLO, C. H. P. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção**. 1. ed. Itajubá: Editora Universidade Federal de Itajubá, 2012.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR E BIOENERGIA. **Bioeletricidade gerada com bagaço cresce 14% em 2023**. São Paulo, 2024. Disponível em: <https://unica.com.br/noticias/bioeletricidade-gerada-com-bagaco-e-palha-cresce-14-em-2023/>. Acesso em: 26 dez. 2024.

VAN DER STELT, M. J. C. *et al.* Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 35, n. 9, p. 3748–3762, 2011a.

VIEIRA, F. R. *et al.* Optimization of slow pyrolysis process parameters using a fixed bed reactor for biochar yield from rice husk. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 132, n. June 2019, p. 105412, 2020.

VUPPALADADIYAM, A. K. *et al.* Bio-oil and biochar from the pyrolytic conversion of biomass: A current and future perspective on the trade-off between economic, environmental,

and technical indicators. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 857, p. 159417, 2022.

WANG, L. *et al.* Effect of torrefaction on physiochemical characteristics and grindability of stem wood, stump and bark. **Applied Energy**, Amsterdam, v. 227, p. 137–148, 2018.

WANG, S. *et al.* Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: A state-of-the-art review. **Progress in Energy and Combustion Science**, Oxford, v. 62, p. 33–86, 2017.

WANG, Z.; LIM, C. J.; GRACE, J. R. A comprehensive study of sawdust torrefaction in a dual-compartment slot-rectangular spouted bed reactor. **Energy**, Oxford, v. 189, p. 116306, 2019.

WANG, C. *et al.* Oxidative torrefaction of biomass residues and densification of torrefied sawdust to pellets. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 127, p. 318–325, 2013.

WIŚNIEWSKI, J. R.; ZOUGMAN, A.; MANN, M. Combination of FASP and stagetip-based fractionation allows in-depth analysis of the hippocampal membrane proteome. **Journal of Proteome Research**, Washington, v. 8, n. 12, p. 5674–5678, 2009.

WORASUWANNARAK, N.; SONOBE, T.; TANTHAPANICHAKOON, W. Pyrolysis behaviors of rice straw, rice husk, and corncob by TG-MS technique. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Amsterdam, v. 78, n. 2, p. 265–271, 2007a.

YAN, B. *et al.* Investigation on microwave torrefaction: Parametric influence, TG-MS-FTIR analysis, and gasification performance. **Energy**, Oxford, v. 220, p. 119794, 2021.

YANG, C.; LÜ, X. Composition of plant biomass and its impact on pretreatment. **Advances in 2nd Generation of Bioethanol Production**, Cambridge, p. 71–85, 2021.

YUE, Y. *et al.* Torrefaction of sorghum biomass to improve fuel properties. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 232, p. 372–379, 2017.

ZENG, K. *et al.* The effect of combined pretreatments on the pyrolysis of corn stalk. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 281, p. 309–317, 2019.

ZHANG, C. *et al.* Torrefaction performance and energy usage of biomass wastes and their correlations with torrefaction severity index. **Applied Energy**, Amsterdam, v. 220, p. 598–604, 2018.

ZHANG, Y.; SONG, K. Thermal and chemical characteristics of torrefied biomass derived from a generated volatile atmosphere. **Energy**, Oxford, v. 165, p. 235–245, 2018.

ZHANG, S. *et al.* Effect of inorganic species on torrefaction process and product properties of rice husk. **Bioresource Technology**, Amsterdam, v. 265, p. 450–455, 2018.

ZHENG, A. *et al.* Impact of torrefaction on the chemical structure and catalytic fast pyrolysis behavior of hemicellulose, lignin, and cellulose. **Energy and Fuels**, Washington, v. 29, n. 12, p. 8027–8034, 2015.