

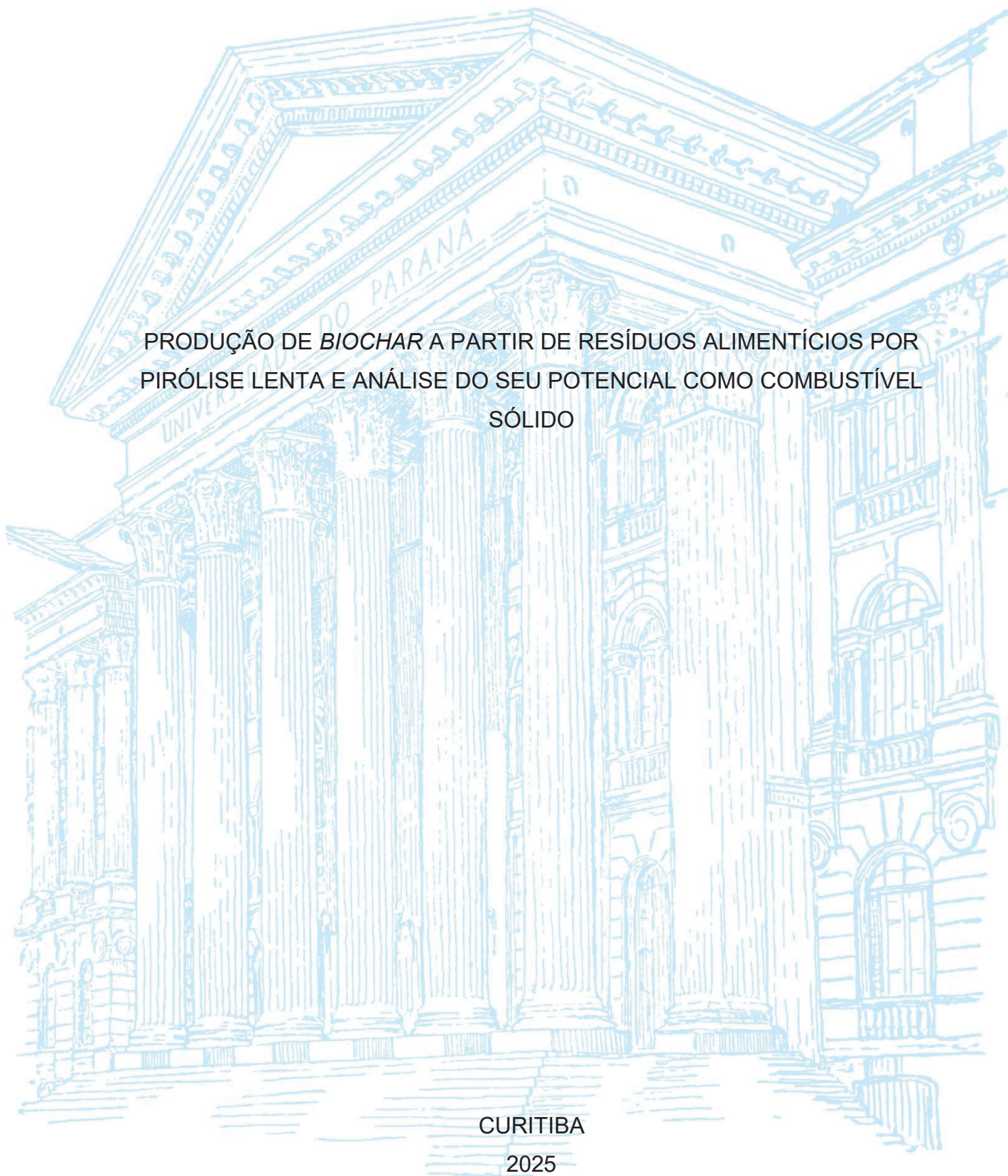
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PAULA PRISCILA DE SOUZA MACHADO GUMZ

PRODUÇÃO DE *BIOCHAR* A PARTIR DE RESÍDUOS ALIMENTÍCIOS POR
PIRÓLISE LENTA E ANÁLISE DO SEU POTENCIAL COMO COMBUSTÍVEL
SÓLIDO

CURITIBA

2025



PAULA PRISCILA DE SOUZA MACHADO GUMZ

PRODUÇÃO DE *BIOCHAR* A PARTIR DE RESÍDUOS ALIMENTÍCIOS POR
PIRÓLISE LENTA E ANÁLISE DO SEU POTENCIAL COMO COMBUSTÍVEL
SÓLIDO

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Orientadora: Profa. Dra. Izabel Riegel Vidotti

Coorientadora: Dra. Mayara Regina Fornari

CURITIBA

2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP) UNIVERSIDADE FEDERAL DO
PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Gumz, Paula Priscila de Souza Machado

Produção de biochar a partir de resíduos alimentícios por pirólise lenta e análise do seu potencial como combustível sólido / Paula Priscila de Souza Machado. – Curitiba, 2025.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

Orientador: Izabel Riegel Vidotti

Coorientador: Mayara Regina Fornari

1. Carvão vegetal. 2. Pirólise. 3. Resíduos vegetais. 4. Resíduos como combustível. I. Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. III. Vidotti, Izabel Riegel. IV. Fornari, Mayara Regina. V. Título.



TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA QUÍMICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **PAULA PRISCILA DE SOUZA MACHADO GUMZ**, intitulada: **PRODUÇÃO DE BIOCHAR A PARTIR DE RESÍDUOS ALIMENTÍCIOS POR PIRÓLISE LENTA E ANÁLISE DO SEU POTENCIAL COMO COMBUSTÍVEL SÓLIDO**, sob orientação da Profa. Dra. IZABEL CRISTINA RIEGEL VIDOTTI MIYATA, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 31 de Outubro de 2025.

Assinatura Eletrônica

03/11/2025 16:00:35.0

IZABEL CRISTINA RIEGEL VIDOTTI MIYATA

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

21/11/2025 16:44:47.0

MARIA HELENE GIOVANETTI CANTERI

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ - FRANCISCO BELTRÃO)

Assinatura Eletrônica

06/11/2025 10:23:23.0

IREDE ANGELA LUCINI DALMOLIN

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)

“Entrega o teu caminho ao Senhor, confia nele, e o mais ele fará.”

Salmos 37:5

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha orientadora, Profa. Dra. Izabel Riegel Vidotti, pela orientação ao longo do mestrado, pela confiança depositada em meu trabalho e pela autonomia concedida durante todo o desenvolvimento da pesquisa, aspectos fundamentais para meu crescimento acadêmico, científico e profissional. Sua condução, sempre criteriosa e atenta, contribuiu de forma decisiva para a consolidação desta dissertação.

À minha coorientadora, Dra. Mayara Regina Fornari, agradeço pela dedicação, paciência e constante disponibilidade em orientar. Seu acompanhamento atento, suas contribuições e esclarecimentos foram essenciais para a construção deste trabalho e para minha formação acadêmica ao longo de todas as etapas da pesquisa.

Agradeço ao colega de laboratório e amigo Michael Yusniel Lopez Infante pelo auxílio no planejamento experimental, pelas trocas de conhecimento e pelo apoio ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Ao Grupo de Pesquisa em Macromoléculas e Interfaces, agradeço a todos os colegas de laboratório pelo apoio, pelas discussões científicas, pela colaboração nas análises realizadas e pelo ambiente cooperativo que tornou a rotina de pesquisa mais produtiva e enriquecedora.

À Fundação Araucária, agradeço pelo apoio financeiro concedido por meio da bolsa de estudos, fundamental para a viabilização deste trabalho. À Universidade Federal do Paraná (UFPR), onde realizei o mestrado, agradeço pela infraestrutura, pelos recursos disponibilizados. À Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), instituição na qual me formei engenheira, agradeço pela sólida formação acadêmica. Agradeço, em especial, à Profa. Dra. Maria Helene Giovanetti Canteri e à Profa. Dra. Irede Angela Lucini Dalmolin, integrantes da banca examinadora, pelas valiosas contribuições acadêmicas, sugestões e reflexões que enriqueceram este trabalho e contribuíram para seu aprimoramento.

À minha família, agradeço pelo incentivo constante aos estudos, pelo apoio incondicional e pela compreensão durante todo esse período de dedicação. Por fim, agradeço ao meu namorado, Guilherme Tuni, pelo apoio, pela paciência, pelo carinho e pela presença ao longo dessa caminhada, tornando esse processo mais leve e significativo.

RESUMO

O crescente aumento na produção industrial resulta em uma maior geração de resíduos em diversos processos, o que, aliado à demanda crescente por energia e à preocupação com os impactos ambientais do uso excessivo de combustíveis fósseis, impulsiona a busca por alternativas sustentáveis. Este trabalho avalia o potencial de uso de *biochar* obtido a partir da pirólise lenta de resíduos alimentícios, especificamente chocolate e wafer, como fonte de energia. Empregando um planejamento experimental do tipo Box-Behnken, foram gerados quinze *biochars* sob diferentes condições de pirólise, variando a temperatura (350, 450 e 550 °C), o tempo de residência (0, 60 e 120 minutos) e o tipo de biomassa, mantendo uma taxa de aquecimento de 10 °C/min e um fluxo constante de nitrogênio. As biomassas foram caracterizadas por meio de análises de umidade, cinzas, termogravimetria e determinação do poder calorífico superior (PCS). Os *biochars* selecionados, com base nos resultados do planejamento experimental, passaram por avaliações de rendimento em massa, PCS, poder calorífico inferior (PCI), densificação energética, rendimento energético, análise elementar, teor de umidade e cinzas e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os resultados indicaram que os *biochars* apresentaram um PCS elevado, com a menor média de 27,371 MJ kg⁻¹ para a biomassa de chocolate processada a 350 °C e a maior média de 32,688 MJ kg⁻¹ para a mesma biomassa a 550 °C, ambas com tempo de residência zero e o PCI dos *biochars* variou de 26,97 MJ kg⁻¹ a 32,31 MJ kg⁻¹. A análise elementar indicou teores de carbono entre 47,04% e 76,02%, hidrogênio entre 5,82% e 6,71% e nitrogênio entre 0,77% e 3,76%, evidenciando o potencial energético dos combustíveis sólidos. Quando comparados com a literatura, os *biochars* produzidos apresentaram valores de PCS e PCI superiores aos reportados para *biochars* obtidos a partir de resíduos industriais, estróbilus, pellets, bagaço de cana-de-açúcar, entre outros. A análise estatística revelou, com um nível de significância de 95%, que apenas a interação entre tempo e temperatura foi estatisticamente relevante. O rendimento em massa variou de 20% a 82%, dependendo das condições de pirólise. Observou-se um ganho energético de até 42,17% em relação à biomassa, sendo o maior rendimento energético alcançado de 91,90%. A estimativa de custo de produção em escala laboratorial variou entre R\$ 1,08·kg⁻¹ e R\$ 9,80·kg⁻¹, equivalendo ao caso mais favorável a R\$ 1.080·tonelada⁻¹. Conclui-se que a conversão de resíduos da indústria alimentícia em *biochar* alia eficiência energética, viabilidade econômica e benefícios ambientais, configurando-se como uma estratégia sustentável de aproveitamento energético.

Palavras-chave: Biocarvão; Otimização da pirólise; Energia; Valorização de resíduos; Box-Behnken.

ABSTRACT

The growing increase in industrial production results in greater generation of waste in several processes, which, combined with the rising demand for energy and concerns about the environmental impacts of excessive fossil fuel use, drives the search for sustainable alternatives. This work evaluates the potential use of *biochar* obtained from the slow pyrolysis of food industry residues, specifically chocolate and wafer, as an energy source. Using a Box–Behnken experimental design, fifteen *biochars* were produced under different pyrolysis conditions, varying temperature (350, 450, and 550 °C), residence time (0, 60, and 120 minutes), and biomass type, while maintaining a heating rate of 10 °C/min and a constant nitrogen flow. The biomasses were characterized through analyses of moisture, ash, thermogravimetry, and higher heating value (HHV). The *biochars* selected, based on the experimental design results, were further evaluated for mass yield, HHV, lower heating value (LHV), energy densification, energy yield, elemental analysis, moisture and ash content, and scanning electron microscopy (SEM). The results indicated that the *biochars* exhibited high HHV, with the lowest average of 27.371 MJ kg⁻¹ for chocolate biomass processed at 350 °C and the highest average of 32.688 MJ kg⁻¹ for the same biomass at 550 °C, both at zero residence time. The LHV of the *biochars* ranged from 26.97 MJ kg⁻¹ to 32.31 MJ kg⁻¹. Elemental analysis showed carbon contents between 47.04% and 76.02%, hydrogen between 5.82% and 6.71%, and nitrogen between 0.77% and 3.76%, highlighting the energetic potential of these solid fuels. When compared with literature data, the produced *biochars* presented HHV and LHV values higher than those reported for *biochars* derived from industrial residues, strobilus, pellets, sugarcane bagasse, among others. Statistical analysis revealed, at a 95% confidence level, that only the interaction between time and temperature was statistically significant. Mass yield varied from 20% to 82%, depending on the pyrolysis conditions. An energy gain of up to 42.17% relative to the biomass was observed, with a maximum energy yield of 91.90%. The estimated production cost at laboratory scale ranged from R\$ 1.08·kg⁻¹ to R\$ 9.80·kg⁻¹, equivalent, in the most favorable case, to R\$ 1,080·ton⁻¹. It is concluded that the conversion of food industry residues into *biochar* combines energy efficiency, economic feasibility, and environmental benefits, characterizing it as a sustainable strategy for energy recovery.

Keywords: *Biochar*; Pyrolysis optimization; Energy; Waste valorization; Box–Behnken.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Consumo setorial de eletricidade do Brasil	17
Figura 2 - Consumo setorial de eletricidade mundial.....	17
Figura 3 - Consumo setorial mundial de carvão mineral.....	18
Figura 4 - Evolução do número de usinas de energia renovável	19
Figura 5 - Participação das fontes da matriz elétrica mundial.....	20
Figura 6 - Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte	21
Figura 7 - Teor médio de gordura das bolachas.....	25
Figura 8 – Teor médio de ácidos graxos saturados e trans nas bolachas	26
Figura 9 – Classificação dos processos de conversão	27
Figura 10 - Processo de pirólise em uma partícula de biomassa	29
Figura 11 - Curva de TG e DTG sob atmosfera de nitrogênio com fluxo de 50mL/min, operando a uma taxa de aquecimento de 10°C/min do chocolate.....	43
Figura 12 - Curva de TG e DTG sob atmosfera de nitrogênio com fluxo de 50mL/min, operando a uma taxa de aquecimento de 10°C/min dos W+	44
Figura 13 - Curva de TG e DTG sob atmosfera de nitrogênio com fluxo de 50mL/min, operando a uma taxa de aquecimento de 10°C/min dos W-.....	45
Figura 14 - Curva de TG sob atmosfera de nitrogênio com fluxo de 50mL/min, operando a uma taxa de aquecimento de 10°C/min dos biscoitos wafers	45
Figura 15 - Curva de DTG sob atmosfera de nitrogênio com fluxo de 50mL/min, operando a uma taxa de aquecimento de 10°C/min dos biscoitos wafers	46
Figura 16 - Gráfico de superfície de resposta do resíduo de chocolate	52
Figura 17 - Gráfico de superfície de resposta do resíduo de W+	53
Figura 18 - Gráfico de superfície de resposta do resíduo de W-	53
Figura 19 - Gráfico de Pareto padronizado	56
Figura 20 - Gráfico dos principais efeitos para o poder calorífico	58
Figura 21 - Gráfico de interação para o poder calorífico.....	59
Figura 22 - Gráfico de superfície de resposta do resíduo de chocolate	60
Figura 23 - Gráfico de superfície de resposta do resíduo de W+	60
Figura 24 - Gráfico de superfície de resposta do resíduo de W-	61
Figura 25 – Micr	

ogrfias eletrônicas de varredura com ampliação de 40x para os experimentos 4 (a) e 5 (b)	66
Figura 26 – Micrografias eletrônicas de varredura do Experimento 4: ampliação de 120x para o grão A (a) e 500x para o grão B (b)	67
Figura 27 – Micrografias eletrônicas de varredura do Experimento 4: ampliações de 2kx e 5kx para o grão A (a e c) e para o grão B (b e d)	68
Figura 28 – Micrografias eletrônicas de varredura do Experimento 5: ampliações de 120x, 500x, 2kx e 5kx	69
Figura 29 – Micrografias eletrônicas de varredura do experimento 7: ampliação de 40x	70
Figura 30 – Micrografias eletrônicas de varredura do Experimento 7: ampliações de 120x, 500x, 2kx e 5kx	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Perfil de ácidos graxos e triacilgliceróis da Manteiga de cacau	24
Tabela 2 - Rendimentos dos produtos obtidos por diferentes métodos de pirólise ...	28
Tabela 3 – Parâmetros do planejamento experimental Box-Behnken	36
Tabela 4 - Codificação das variáveis do planejamento experimental	36
Tabela 5 - Resultado do teor de umidade e cinzas	41
Tabela 6 - Etapas de decomposição térmica dos resíduos alimentícios.....	47
Tabela 7 – Poder calorífico das biomassas analisadas	48
Tabela 8 – Poder calorífico de outras biomassas.....	49
Tabela 9 - Rendimento em massa do <i>biochar</i> sob diferentes condições de pirólise .	50
Tabela 10 - Poder calorífico do <i>biochar</i> sob diferentes condições de pirólise.....	54
Tabela 11 – Poder calorífico de outros <i>biochars</i>	55
Tabela 12 – Estimativa do Poder Calorífico: Valores Observados e Ajustados	62
Tabela 13 – Condições ótimas para maximização do poder calorífico do <i>biochar</i>	63
Tabela 14 - Densificação energética e rendimento energético dos <i>biochars</i> produzidos	64
Tabela 15 – Resultado do teor de umidade e cinzas.....	72
Tabela 16 – Análise elementar dos <i>biochars</i> produzidos	74
Tabela 17 - Valores de PCI para os experimentos selecionados	76
Tabela 18 - Tempo de ciclo e consumo de energia	79
Tabela 19 - Custo de energia por quilo	81
Tabela 20 - Massa necessária de biomassa	82

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS.....	18
1.1.1 Objetivo Geral	18
1.1.2 Objetivos Específicos	18
2 REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1 PRODUÇÃO E CONSUMO ENERGÉTICO DA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA	16
2.2 BIOMASSA COMO FONTE DE ENERGIA.....	19
2.2.1 Chocolate	23
2.2.2 Wafer	25
2.3 PIRÓLISE	27
2.3.1 <i>Biochar</i>	30
2.4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL BOX-BEHNKEN	31
2.5 CUSTOS E VIABILIDADE ECONÔMICA DO <i>BIOCHAR</i>	32
3 MATERIAL E MÉTODOS	35
3.1 BIOMASSAS.....	35
3.2 PRODUÇÃO DO <i>BIOCHAR</i>	35
3.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL BOX-BEHNKEN	35
3.4 CARACTERIZAÇÃO DAS BIOMASSAS E <i>BIOCHARS</i>	37
3.5 ESTUDO DO POTENCIAL DOS <i>BIOCHARS</i> PARA USO COMO COMBUSTÍVEL	
39	
3.6 CUSTOS	40
4 RESULTADOS	41
4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS BIOMASSAS	41
4.1.1 Teor de umidade e cinzas	41
4.1.2 Análise Termogravimétrica (TG)	42
4.1.3 Poder calorífico	48
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS <i>BIOCHARS</i>	50
4.2.1 Rendimento em massa	50
4.2.2 Poder calorífico	53
4.2.3 Densificação energética e rendimento energético	63
4.2.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	65
4.2.5 Teor de umidade e cinzas	71

4.2.6 Análise elementar	74
4.2.7 Poder Calorífico Inferior (PCI)	75
4.2.8 Custos	77
4.2.8.1 Disponibilidade e Confidencialidade de Dados	77
4.2.8.2 Custos de Produção de <i>Biochar</i>	78
4.2.8.3 Consumo de Energia nos Experimentos	79
4.2.8.4 Rendimento e Massa de <i>Biochar</i> por Ciclo	79
4.2.8.5 Custo por Quilo de <i>Biochar</i>	80
4.2.8.6 Comparação de Potencial Energético: Biomassas vs. Bagaço de Cana	82
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO	84
REFERÊNCIAS	86
APÊNDICE A - ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA O PODER CALORÍFICO DO BIOCHAR	97

1 INTRODUÇÃO

A produção das indústrias alimentícias tem experimentado um crescimento contínuo. Recentemente, dados da Associação Brasileira da Indústria de Chocolates, Amendoim e Balas (Abicab) revelaram um aumento significativo na produção de chocolates no ano de 2022, com um crescimento de 8% comparado a 2021. O crescimento manteve-se em 2023, com o país atingindo a marca de 805 mil toneladas de chocolates produzidos, um aumento de 6% em comparação ao ano anterior (Abicab, 2023).

Simultaneamente, a produção de biscoitos também registrou um crescimento expressivo. De acordo com a Associação Brasileira das Indústrias de Biscoitos, Massas Alimentícias e Pães & Bolos Industrializados (Abimapi), o setor movimentou R\$ 70,464 bilhões em 2023, uma alta de 9,6% em relação ao ano de 2022 (Abimapi, 2023).

Esse aumento significativo na produção, resulta em uma maior geração de resíduos em diversos processos industriais, intensificando a necessidade de gerenciar esses resíduos e buscar soluções sustentáveis. Nesse contexto, especialmente devido à problemática ambiental, tem sido de grande interesse encontrar meios alternativos para a minimização ou reaproveitamento de resíduos provenientes da indústria alimentícia, transformando-os em um produto de valor agregado.

Além disso, as discussões sobre a preservação do meio ambiente para as futuras gerações têm sido cada vez mais recorrentes, especialmente em relação ao aquecimento global e às emissões de carbono. Esses temas tornaram-se centrais em todos os projetos de geração de energia. Embora as energias renováveis, estejam crescendo, o carvão mineral ainda permanece como uma das principais fontes de energia e segundo a Agência Internacional de Energia (AIE), a demanda global por carvão deve se manter estável em 2024 e 2025 (IEA, 2024).

Dessa forma, substituir os combustíveis fósseis por fontes renováveis de energia, como a biomassa, tem sido uma das estratégias eficazes para reduzir as emissões de gases de efeito estufa associadas à produção de energia.

A biomassa inclui toda a matéria vegetal e seus derivados, originados pela fotossíntese, que podem ser empregados na geração de energia (Yu *et al.*, 2015; Vidal; Hora, 2011; ANEEL, 2008). Além disso, Singh *et al.* (2014) complementam essa definição ao classificar a biomassa em três categorias com base em sua origem:

primária, que provém diretamente da natureza, secundária, resultante do processamento de recursos primários, e terciária, que abrange os resíduos pós-consumo humano. Analisando pela perspectiva energética, os resíduos alimentícios do presente estudo podem ser considerados biomassa secundária, tornando-se uma opção viável para a geração de energia.

Assim, dois resíduos da indústria de alimentos foram analisados nesse trabalho buscando as suas aptidões para a produção de energia: chocolate e wafer. O chocolate é um alimento derivado da semente do cacau. Segundo a Resolução RDC (Resolução da Diretoria Colegiada) nº 264 de 2005, o chocolate é definido como um produto resultante da combinação de derivados de cacau, massa (também conhecida como pasta ou licor) de cacau, cacau em pó e/ou manteiga de cacau, juntamente com outros componentes (Lipp; Anklam, 1998; Jin *et al.*, 2021).

Já os wafers, que são considerados como biscoitos ou bolachas, são o resultado da mistura e cozimento adequado de uma massa preparada a partir de farinhas, amidos, féculas, que podem ser fermentados ou não, juntamente com outras substâncias alimentícias (Brasil, 1978). Pesquisas relatam que as bolachas wafer possuem altas quantidades de gorduras totais (Bottan, 2010; Pinto, 2016; Montilla, 2023).

Dado o elevado teor de carbono nestes resíduos, é pertinente considerar as sobras de processamento como potencial fonte alternativa de energia. Nesse cenário, a pirólise emerge como uma opção promissora. A pirólise é uma reação termoquímica que envolve a degradação térmica de materiais orgânicos, podendo ocorrer na ausência total ou parcial de oxigênio. Trata-se de um processo endotérmico que possibilita a conversão da biomassa em três frações: sólidos (*biochar*), líquidos (bio-óleo) e gasosos (biogás) (Alves *et al.*, 2020; Bridgwater, 2004; Lora *et al.*, 2012).

O *biochar* é um material rico em carbono que, dependendo das condições de pirólise, pode apresentar diferentes características, tornando-se altamente versátil. Assim, esse material carbonoso, pode ser utilizado na adsorção de contaminantes, como matéria-prima para produtos químicos e aditivos de solo, além de auxiliar no sequestro de carbono. Como combustível sólido, o *biochar* possui baixo teor de enxofre, tornando-o uma alternativa sustentável para processos de combustão doméstica e industrial (Amenaghawon *et al.*, 2021; Carvalho *et al.*, 2021; Kisiki *et al.*, 2015; Tomassoni *et al.*, 2023).

Além disso, este estudo se alinha aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU, 2015), especialmente ao ODS 7 — Energia Acessível e Limpa — e ao ODS 12 — Consumo e Produção Responsáveis. A valorização de resíduos alimentícios por meio da pirólise para produção de *biochar* representa uma alternativa tecnológica que contribui para a diversificação da matriz energética, redução da dependência de combustíveis fósseis e mitigação de impactos ambientais, reforçando a importância de soluções sustentáveis que conciliem eficiência energética, viabilidade econômica e preservação ambiental (ONU, 2015).

Neste contexto, diante do desafio de atender às necessidades energéticas de forma sustentável e considerando a oportunidade de reaproveitamento dos resíduos gerados, a presente pesquisa tem como objetivo caracterizar os materiais provenientes de uma indústria alimentícia, produzir *biochar* por meio do processo de pirólise e avaliar o seu potencial energético como combustível sólido.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Obter e otimizar a produção de *biochar* por pirólise lenta de resíduos alimentícios com potencial uso como combustível sólido.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Determinar a melhor condição para produzir *biochar*, a partir do planejamento experimental;
- Caracterizar fisicamente e quimicamente as biomassas e os *biochars*;
- Determinar o potencial energético dos *biochars* como combustível sólido;
- Avaliar a substituição dos *biochars* obtidos em relação ao bagaço de cana-de-açúcar como fonte de energia em caldeiras;
- Estimar o custo de produção, a fim de avaliar a viabilidade econômica da aplicação do estudo na indústria.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 PRODUÇÃO E CONSUMO ENERGÉTICO DA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA

O crescimento da indústria alimentícia no Brasil tem impulsionado tanto a economia quanto a demanda por energia. O setor de biscoitos e massas industrializados apresentou um crescimento expressivo nos últimos anos. Em 2022, o segmento movimentou R\$ 64,2 bilhões, e, em 2023, esse valor subiu para R\$ 70,4 bilhões, representando um crescimento de 9,6%, conforme Abimapi. A categoria de biscoitos liderou as vendas no mercado nacional, registrando um faturamento de R\$ 32,5 bilhões e um volume de 1,5 milhão de toneladas consumidas. Entre os tipos mais vendidos, destacaram-se os recheados doces (22,95%), as bolachas água e sal (12,44%) e os doces amanteigados (10,16%) (Abimapi, 2023).

Além do mercado interno, as exportações do setor também apresentaram crescimento. No primeiro semestre de 2024, as exportações de biscoitos brasileiros atingiram 31 mil toneladas, gerando uma receita de US\$ 71,2 milhões e alcançando 115 países. Dentre os principais produtos exportados, os wafers foram os mais comercializados, totalizando 12,1 mil toneladas e somando US\$ 36,8 milhões, o que representou um aumento de 4% no faturamento em relação ao mesmo período de 2023. Os dados foram divulgados no Dia Nacional do Biscoito pela Abimapi, reforçando o crescimento da produção e vendas do setor (Agência Brasil, 2024).

Já no setor de doces e chocolates, a produção também tem demonstrado uma tendência de crescimento nos últimos anos. De acordo com a Abicab em 2022, foram fabricadas 760 mil toneladas de doces, e, no ano seguinte, esse número subiu para 805 mil toneladas, representando um aumento de 6%. O consumo per capita também apresentou elevação, passando de 3,6 kg por habitante em 2022 para 3,9 kg em 2023. Além disso, a produção específica de itens sazonais, como ovos de chocolate, atingiu 10,8 mil toneladas em 2023, um crescimento de 21% em relação ao ano anterior (Agência Brasil, 2023).

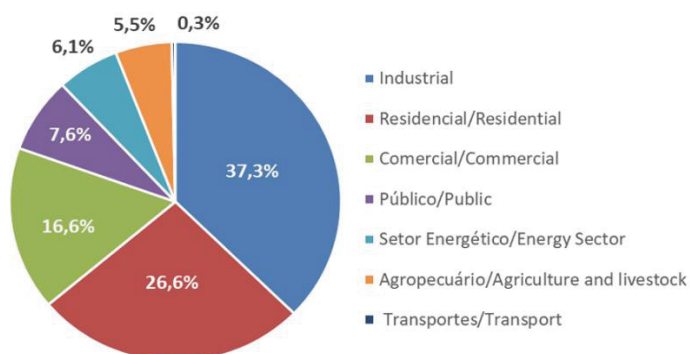
Em 2024, houve um novo crescimento na fabricação de produtos voltados para a Páscoa. A Abicab estimava um aumento de 15%, mas o crescimento superou essa projeção, chegando a 17%. Como resultado, aproximadamente 58 milhões de unidades de ovos de Páscoa foram disponibilizadas no mercado. Além desse crescimento na produção, também foram desenvolvidos 115 novos produtos,

expandindo a oferta para 611 itens, que incluem ovos tradicionais, tabletes, caixas de bombom e chocolates em diferentes formatos e faixas de preço (G1, 2024).

Esse avanço reflete não apenas a alta demanda do mercado consumidor, mas também a necessidade de maior capacidade produtiva, impactando diretamente o consumo energético da indústria. E conseqüentemente, uma maior geração de resíduos dessas indústrias.

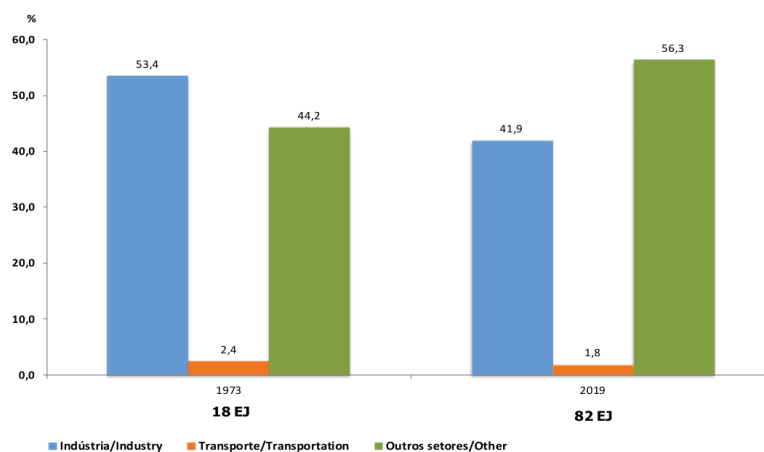
De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023), em 2022, a indústria como um todo, destacou-se como a principal consumidora de energia elétrica no Brasil, respondendo por 37,3% do total consumido (Figura 1). Além disso, conforme dados da EPE sobre o consumo setorial mundial de eletricidade (Figura 2), evidenciando que, embora a participação da indústria tenha diminuído de 53,4% para 41,9% entre 1973 e 2019, o setor ainda desempenha um papel significativo.

Figura 1- Consumo setorial de eletricidade do Brasil



Fonte: EPE (2023)

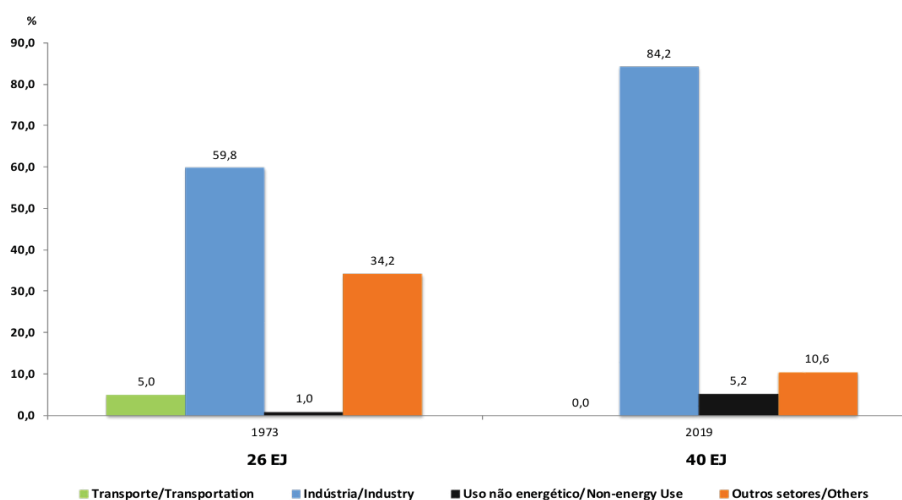
Figura 2 - Consumo setorial de eletricidade mundial



Fonte: EPE apud (IEA) (2023)

Outro ponto importante, como observado na Figura 3, é o consumo setorial mundial de carvão, indicando que a indústria é a principal consumidora, com um aumento de 59,8% em 1973 para 84,2% em 2019. Sabe-se que a exploração do carvão mineral, apesar de sua relevância econômica, resulta em impactos socioambientais significativos ao longo de todo o seu ciclo produtivo, desde a extração e beneficiamento até a combustão. Nessas etapas, há a liberação de poluentes que afetam tanto os ecossistemas naturais quanto os centros urbanos, podendo causar danos irreversíveis.

Figura 3 - Consumo setorial mundial de carvão mineral



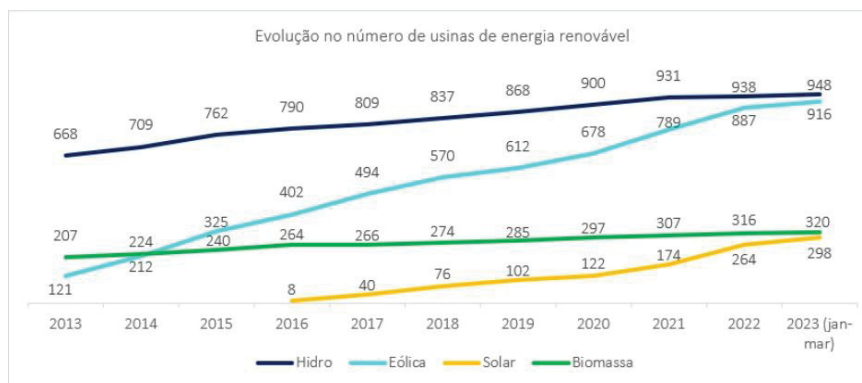
Fonte: EPE apud (IEA) (2023)

Os dados (Figura 3) demonstram que, em comparação com outros setores, a indústria continua a liderar o consumo de eletricidade e carvão mineral, o que destaca a importância de diversificar as fontes energéticas e melhorar a eficiência no uso dos recursos disponíveis.

Nesse contexto, a biomassa emerge como uma alternativa renovável de grande relevância. Embora haja um esforço para expandir a participação da biomassa na matriz energética, a evolução do número de usinas ainda é modesta. De acordo com a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), a evolução do número de usinas de energia renovável (Figura 4) no Brasil, apresentou um pequeno crescimento em comparação com outras fontes desde 2013. Essa evolução é representada por uma linha quase horizontal no gráfico, em contraste com os aumentos observados nas outras fontes de energias renováveis como as usinas

hidrelétricas, eólicas e solares. Esse cenário evidencia a necessidade de estratégias mais eficazes para ampliar o aproveitamento da biomassa, reconhecendo seu potencial como uma fonte renovável essencial muitas vezes, proveniente de resíduos com grande impacto socioambiental.

Figura 4 - Evolução do número de usinas de energia renovável



Fonte: CCEE (2023)

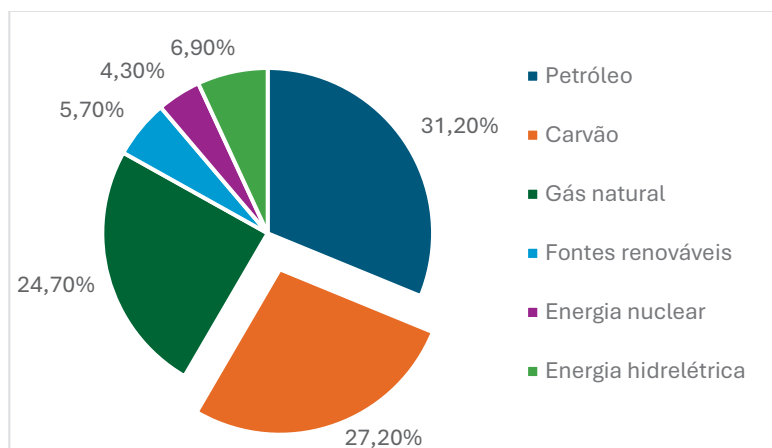
2.2 BIOMASSA COMO FONTE DE ENERGIA

Um dos principais desafios no setor energético é encontrar alternativas que minimizem o impacto ambiental e sejam economicamente viáveis. Desde o início dos anos 2000, a pesquisa em bioenergia tem ganhado destaque, resultando em um aumento notável no número de publicações sobre o tema. De acordo com Huang *et al.* (2020), já foram registradas mais de 30.000 publicações sobre o tema, evidenciando a crescente intensificação dos estudos sobre fontes de energia renováveis. No entanto, apesar do avanço tecnológico e do aumento do interesse na área, a transição para essas fontes ainda enfrenta desafios econômicos, técnicos e políticos que dificultam sua implementação em larga escala.

Outro aspecto relevante sobre o consumo de energia é a projeção da AIE, que estima um aumento de aproximadamente 70% na demanda global por energia até 2050, o que levará um possível aumento de 60% nas emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) em comparação com os níveis de 2011 (IEA, 2014). Além disso, a World Energy Resource aponta que a queima de combustíveis fósseis é responsável por 86% do consumo mundial de energia. O petróleo, o carvão e o gás natural são os principais responsáveis, contribuindo com mais de 70% do consumo global. Esses

dados evidenciam que a queima desses combustíveis continua a ser o maior fator de emissão de gases de efeito estufa (Huang *et al.*, 2019). Na Figura 5, é possível ter uma visão da participação das fontes de energia no mundo, em porcentagem.

Figura 5 - Participação das fontes da matriz elétrica mundial



Fonte: Adaptado de BP (2021)

Diante desse cenário, torna-se essencial expandir a geração de energia a partir de fontes limpas e renováveis. A transição para alternativas sustentáveis pode redefinir o panorama global, influenciando diretamente as responsabilidades associadas às emissões de GEE. O desenvolvimento e a implementação de tecnologias mais eficientes são fundamentais para mitigar os impactos ambientais e reduzir a dependência de combustíveis fósseis, contribuindo para um sistema energético mais sustentável a longo prazo.

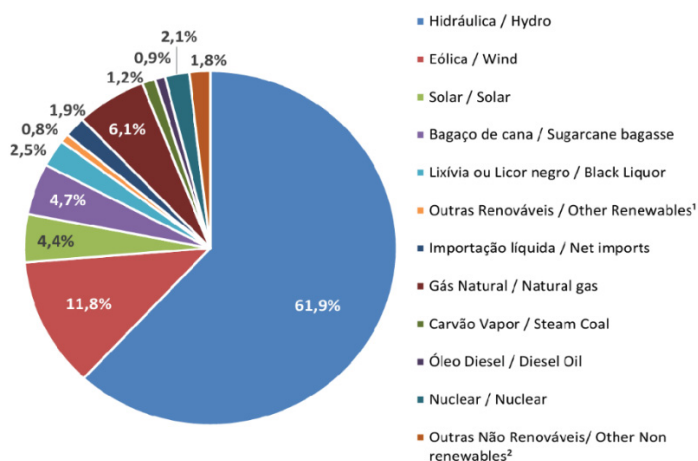
Embora a participação das energias renováveis na matriz energética global ainda seja modesta, representando cerca de 6% do consumo mundial de energia primária, a biomassa apresenta um grande potencial de expansão nos próximos anos. Em diversas regiões, continua sendo uma das principais fontes de energia térmica e elétrica, com destaque para o uso de madeira, resíduos agrícolas e de origem animal. Historicamente, a biomassa tem sido utilizada como fonte de energia desde os primórdios da humanidade. A madeira desempenhou um papel essencial no aquecimento, na cocção de alimentos e até mesmo na proteção contra predadores. Com o passar dos séculos, seu uso se expandiu para outras finalidades, como a produção de armas e ferramentas (IEA, 2014). Na China, por exemplo, em 2006, cerca

de 30 milhões de pessoas ainda não tinham acesso à eletricidade e dependiam da biomassa tradicional para suprir suas necessidades energéticas (Guardabassi, 2006).

No Brasil, a matriz elétrica é uma das mais limpas do mundo, conforme dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). As fontes renováveis representam 85% dessa matriz, sendo cerca de 60% provenientes da energia hidráulica, 8% de biomassa, 11% de energia eólica, 2% de energia solar centralizada e 5% de geração distribuída, principalmente através de painéis solares (ANEEL, 2022).

No entanto, a forte dependência da energia hidrelétrica apresenta desafios, especialmente diante das mudanças climáticas, que impactam os regimes hídricos e comprometem a capacidade de geração. Além disso, a falta de investimentos na infraestrutura das bacias de captação agrava o problema, podendo levar ao racionamento de energia. Nesse contexto, torna-se fundamental explorar outras alternativas energéticas para reduzir essa vulnerabilidade. Assim a biomassa, surge como uma alternativa promissora. Conforme a EPE (2023), a geração de eletricidade a partir da biomassa concentra-se principalmente na indústria sucroalcooleira, representando 4,7% (Figura 6) da matriz elétrica nacional. Esse aproveitamento está diretamente relacionado ao período de colheita da cana-de-açúcar, que ocorre entre abril e novembro, coincidindo com a estiagem nas regiões Nordeste e Centro-Oeste. Durante essa fase, a geração hidrelétrica enfrenta desafios devido à redução dos reservatórios, tornando a biomassa proveniente do bagaço e da palha da cana uma alternativa estratégica para a cogeração de eletricidade.

Figura 6 - Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte



Fonte: EPE (2023)

Além da biomassa sucroalcooleira, a grande quantidade de resíduos industriais e alimentícios gerados diariamente representa uma oportunidade para a diversificação da matriz energética. O aproveitamento desses resíduos amplia a participação da biomassa na geração de eletricidade, tornando-se uma estratégia viável e sustentável. Subprodutos da indústria de alimentos, como cascas, bagaços e restos de processamento, representam um potencial energético ainda subexplorado, oferecendo uma alternativa promissora para a geração de eletricidade e a redução de desperdícios.

Sob a perspectiva energética, a biomassa engloba todos os materiais orgânicos, sejam de origem animal ou vegetal, que podem ser utilizados na produção de energia (Vidal; Hora, 2011; ANEEL, 2008). Além disso, segundo Singh *et al.* (2014), a biomassa pode ser classificada em três categorias principais:

- Biomassa Primária: Esta categoria engloba recursos provenientes diretamente da natureza. Trata-se de materiais orgânicos não processados;
- Biomassa Secundária: Os resíduos da categoria secundária são resultantes do processamento físico, químico ou biológico aplicado aos recursos primários;
- Biomassa Terciária: Nesta categoria estão incluídos os resíduos remanescentes após o consumo e uso humano.

No contexto dos produtos alimentícios analisados, a biomassa primária inclui a casca de cacau e os grãos de cacau frescos, utilizados diretamente na produção de chocolate. Esses elementos são coletados durante as etapas iniciais do cultivo e colheita do cacau, antes de qualquer processamento industrial.

A biomassa secundária refere-se aos resíduos gerados durante a produção dos produtos alimentícios. Para o chocolate, isso inclui os restos de massa que não são aproveitados na produção final, como as sobras que não se enquadram nas especificações legais ou nas exigências de qualidade. Da mesma forma, no caso do wafer, os resíduos incluem as sobras que resultam do corte e moldagem, como pedaços de massa que não atendem às especificações finais.

Por fim, a biomassa terciária compreende os resíduos que permanecem após o consumo dos produtos. No caso do chocolate e do wafer, isso inclui as embalagens vazias que são descartadas pelos consumidores, bem como os resíduos alimentares, como pedaços de wafer que não são consumidos e acabam sendo descartados. Ao

analisar as definições, nota-se que a biomassa secundária reflete precisamente as biomassas em estudo.

2.2.1 Chocolate

A fabricação do chocolate tem início com o processamento das sementes do cacau, que passam por um ciclo de fermentação, secagem, limpeza e torrefação. Em seguida, a casca é removida, e o NIB (núcleo interno da semente de cacau) é submetido a uma etapa de purificação e moagem. O resultado desse processo é uma pasta de cacau com elevado teor de gordura, posteriormente combinada com diversos ingredientes, como leite, baunilha e açúcar. A próxima fase, denominada conchagem, envolve a adição de manteiga de cacau e a agitação da pasta a temperaturas controladas (Herme, 2006; Verna, 2013).

As principais variedades de chocolates encontrados no mercado são o chocolate branco, ao leite e o meio amargo, os quais se distinguem de acordo com a sua composição química.

Leis foram estabelecidas para determinar os níveis mínimos dos principais componentes do chocolate. Desde 2005, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (Anvisa) definiu que o chocolate deve conter pelo menos 25% de sólidos totais de cacau. Contudo, em 2017, um projeto de lei foi aprovado, alterando os requisitos mínimos para diferentes tipos de chocolate. De acordo com essa nova legislação, o chocolate ao leite deve conter no mínimo 27% de sólidos de cacau, o amargo ou meio amargo deve apresentar pelo menos 35%, e o branco deve ter no mínimo 20% de manteiga de cacau (MC) em sua composição (Jusbrasil, 2017).

A MC possui uma significativa quantidade de gorduras saturadas, vestígios de cafeína e teobromina. Além disso, contém compostos antioxidantes (Naik; Kumar, 2014). Sua composição físico-química, pode ser caracterizada pela quantidade em ácidos graxos, sendo rica em ácido palmítico (C16:0), ácido esteárico (C18:0) e ácido oleico (C18:1). Além disso, a manteiga de cacau apresenta uma característica que resulta na presença de três principais triacilgliceróis simétricos: 1,3-dipalmitato-2-oleato triacilglicerol (POP), 1,3-diestearato-2-oleato triacilglicerol (StOSt) e 1-palmitato-2-oleato-3-estearato triacilglicerol (POSt). (Liu *et al.*, 2007; Jin *et al.*, 2021).

A Tabela 1 exibe a porcentagem da composição de ácidos graxos e triacilgliceróis encontrados na MC.

Tabela 1 - Perfil de ácidos graxos e triacilgliceróis da Manteiga de cacau

Tipos de ácidos graxos	%
Ácidos graxos saturados	57 – 64
Palmitico (C16:0)	24,5 - 33,7
Esteárico (C18:0)	33,7 - 40,2
Mirístico (C14:0)	0 – 4
Araquídico (C20:0)	1
Láurico (C12:0)	0,1
Ácidos graxos insaturados	36 – 43
Oleico (C18:1)	26,3 - 35,0
Palmitoleico (C16:1)	0 – 4
Linoleico (C18:2)	1,7 - 3,0
α-Linoleico	0 – 1
Outros	1,6
Triacilglicerol	≥ 70
1-palmitato-2-oleato-3- estearato triacilglicerol (POST)	42,2
1,3-diestearato-2-oleato triacilglicerol (StOSt)	24,2
1,3-dipalmitato-2-oleato triacilglicerol (POP)	21,8

Fonte: Adaptado de Gunstone (2011)

Ao examinar os sólidos de cacau, estudos revelam a presença de compostos polifenólicos que exibem propriedades antioxidantes. Estes compostos podem ser categorizados em duas classes distintas no cacau, os taninos e os flavonoides (Sarmiento, 2007; Wollagst; Anklam, 2000).

Os cuidados na produção de chocolate são essenciais para garantir a qualidade do produto, sendo a umidade um dos principais fatores que requer monitoramento rigoroso durante todo o processo. A presença de água pode provocar diversos problemas: a falta de controle pode gerar empelotamento, no qual as barras de chocolate formam gotículas na superfície e aderem umas às outras, interrompendo a linha de produção. Além disso, a umidade favorece o aparecimento de Sugar Bloom, caracterizado pela migração do açúcar para a superfície, formando cristais esbranquiçados que comprometem a aparência e a textura do chocolate. O excesso

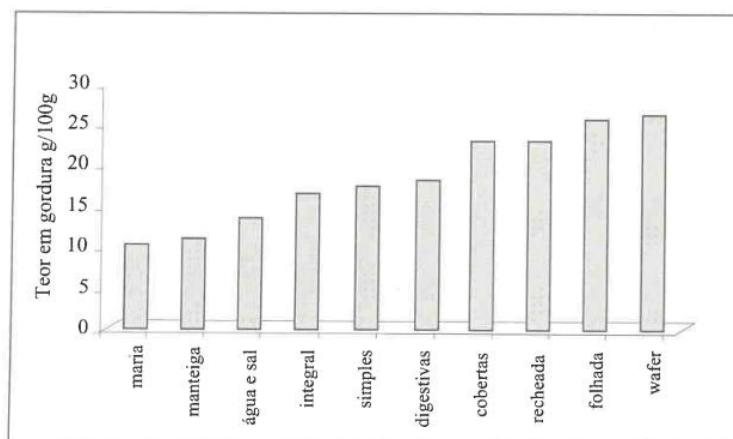
de água, especialmente em produtos com recheios úmidos ou armazenados em ambientes úmidos, também pode levar ao desenvolvimento de mofo, representando um risco microbiológico ao produto. Paralelamente, o Fat Bloom, causado pela migração e recristalização irregular da manteiga de cacau, gera manchas esbranquiçadas e oleosas, comprometendo a aparência do chocolate mesmo em condições de baixa umidade. Dessa forma, o controle adequado da umidade e da temperatura é essencial para assegurar a qualidade, estabilidade e segurança do chocolate (Revista Padaria Moderna, 2021).

2.2.2 Wafer

Os biscoitos wafer se destacam por suas características específicas relacionadas aos ingredientes. Geralmente, esses biscoitos são compostos por placas de wafer que servem como suporte para diferentes tipos de recheio, como creme, chocolate, caramelo ou marshmallow, criando assim uma espécie de sanduíche (Manley, 2011; Tiefenbacher, 2017.)

Os wafers são compostos por placas com baixo teor de açúcar, ou até mesmo ausência deste, sendo seu nível de gordura determinado principalmente pelo recheio. Diversos autores avaliaram a quantidade de ácidos graxos e gorduras totais no biscoito. No estudo conduzido por Vicente (2007), foi realizada uma análise abrangente de bolachas de diferentes países, incluindo o Brasil. Os resultados revelaram que, entre as bolachas recheadas, os wafers apresentaram o maior teor de gordura, com valores excedendo 25%, como indicado na Figura 7.

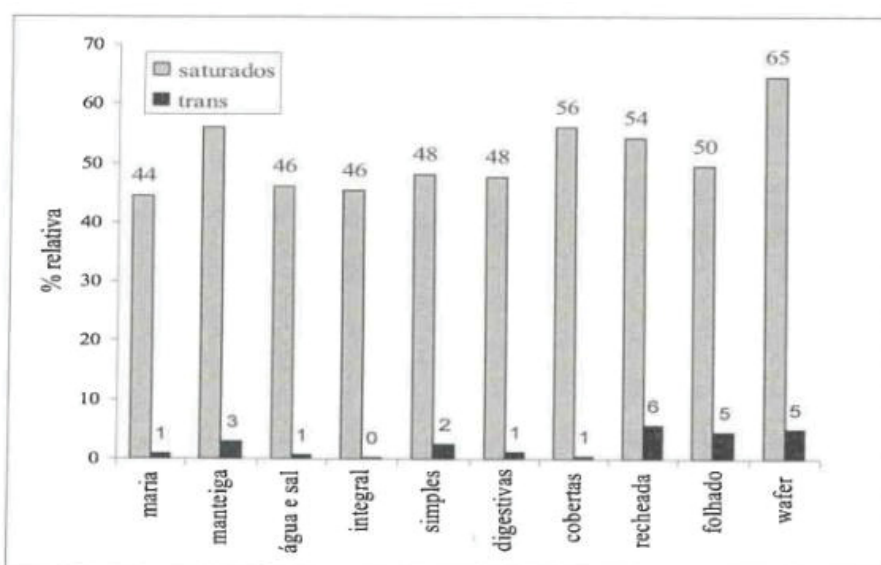
Figura 7 - Teor médio de gordura das bolachas



Fonte: Vicente (2007)

Além disso, ao investigar os ácidos graxos saturados, o pesquisador encontrou uma média de 65% para os wafer, destacando que em algumas amostras específicas, os valores ultrapassaram 90% (Figura 8). Adicionalmente, Montilla (2023) conduziu um estudo com wafers, rotulados como isentos de ácidos graxos trans. Entretanto, a pesquisa apresentou valores de percentual de gordura nas quarenta amostras de bolachas wafer de 16,99 a 36,14.

Figura 8 – Teor médio de ácidos graxos saturados e trans nas bolachas



Fonte: Vicente (2007)

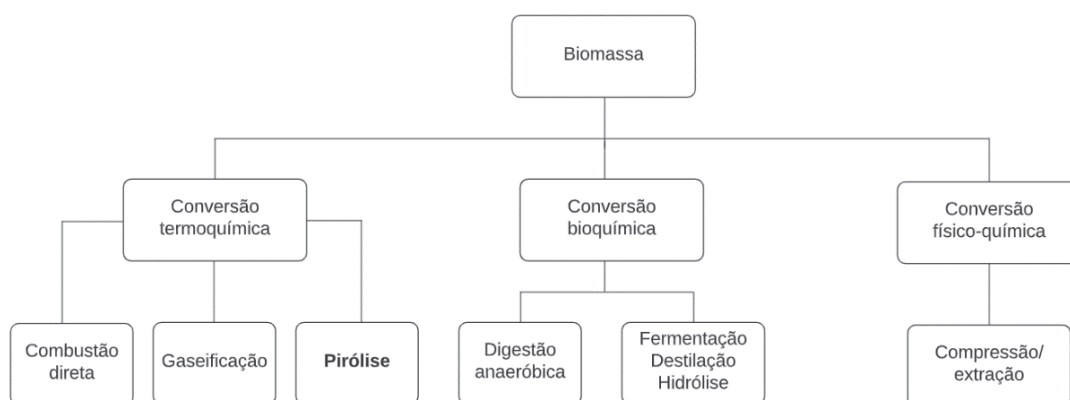
A geração de resíduos durante a fabricação de wafer constitui um desafio significativo para a indústria. Feliz (2013) observou que os desperdícios podem ultrapassar 10% da produção total. Parte desses resíduos, como os retalhos, é reprocessada, o que pode acarretar riscos de contaminação, enquanto outra fração é destinada à ração animal, apesar de não ser adequada devido à presença de teobromina, que pode causar intoxicação em algumas espécies. Além disso, os resíduos contaminados ou queimados são descartados como lixo orgânico, e, mesmo com fornos automatizados, o consumo de energia continua a ser um dos principais custos da produção, destacando a necessidade de aumentar a eficiência no processo.

2.3 PIRÓLISE

Com o intuito de extrair a energia contida nessas fontes e/ou tornar os resíduos em subprodutos, foram desenvolvidos processos de conversão, os quais se categorizam de acordo com a natureza das técnicas aplicadas à biomassa: termoquímicas, bioquímicas e físico-químicas.

A Figura 9 ilustra os três processos encontrados na literatura, evidenciando que a pirólise está compreendida dentro da categoria de conversão termoquímica.

Figura 9 – Classificação dos processos de conversão



Fonte: Autoria própria (2023)

Uma das principais vantagens da pirólise consistem em reduzir o volume de resíduos e viabilizar sua aplicação para propósitos energéticos e não-energéticos (Wang *et al.*, 2023).

A pirólise é uma alternativa promissora para o aproveitamento de resíduos, sendo um processo de decomposição térmica de matriz com estruturas carbônicas na ausência total ou parcial de oxigênio. Comparada à combustão, gera menores emissões de CO e CO₂. Esse processo pode resultar em três principais produtos: *biochars* (fração sólida), gases permanentes e vapores, compostos por gás de síntese ou biogás contendo CO, CO₂, H₂, CH₄, C₂H₄, C₂H₆ e outros hidrocarbonetos. Quando resfriados à temperatura ambiente, alguns desses vapores se condensam, dando origem ao bio-óleo (Lehmann *et al.*, 2006; Nóbrega, 2011; Pedroza *et al.*, 2010).

A quantidade de produtos obtidos na pirólise é afetada principalmente pelas seguintes variáveis: a temperatura de pirólise, a velocidade de aquecimento, tempo

de permanência na zona de reação, composição da matéria-prima e o tamanho da partícula (Bridgwater, 2004; Lora *et al.*, 2012; Farias *et al.*, 2020; Pedroza *et al.*, 2014).

Os processos que envolvem a pirólise da biomassa são realizados geralmente à pressão atmosférica, e temperaturas que variam de 300 a 900 °C. A decomposição térmica na pirólise envolve diversos fenômenos de transferência de calor e massa, ocorrendo tanto no interior quanto na superfície das partículas. A temperatura exerce um papel fundamental nesse processo: valores mais baixos, combinados com tempos de residência prolongados, favorecem a formação de carvão. Em contrapartida, temperaturas mais altas e tempos de residência maiores aumentam a conversão da biomassa em gás, com poder calorífico médio (13-21 MJ Nm⁻¹). Já para a obtenção de líquidos, são mais adequadas temperaturas intermediárias associadas a tempos de residência reduzidos (Ansari *et al.*, 2018; Zabaniotou *et al.*, 2008; Bridgwater, 2001). Com base nesses parâmetros, a pirólise pode ser classificada em dois tipos principais: a pirólise lenta, que se caracteriza por um tempo de residência mais longo, e a pirólise rápida, que é caracterizada por um tempo de residência mais curto. Bridgwater (2001) propõe uma classificação detalhada dos rendimentos dos produtos destes diferentes tipos de pirólise, conforme ilustrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Rendimentos dos produtos obtidos por diferentes métodos de pirólise

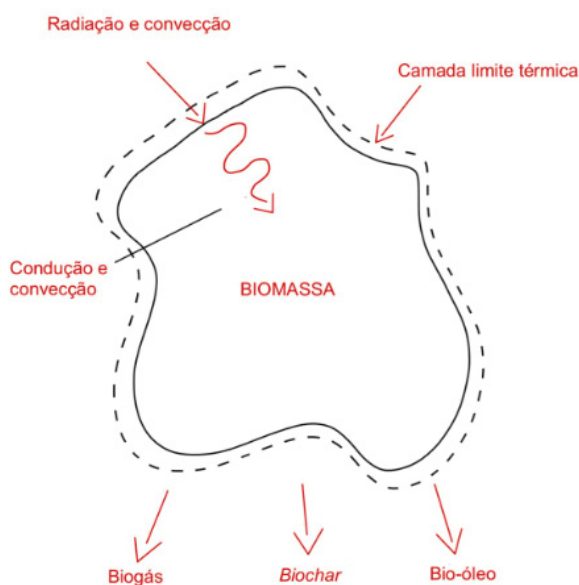
Métodos		Rendimentos em:		
		Líquido	Sólido	Gás
Pirólise rápida	Temperatura de processo moderada (450-550°C), curtos tempos de residência dos vapores e biomassa (< 2 s) com baixa granulometria.	75%	12%	13%
Pirólise lenta (Carbonização)	Baixas temperaturas (400-450°C), curtos tempos de residência (pode ser de horas ou dias), partículas grandes.	30%	35%	35%
Gaseificação	Alta temperatura (900°C), longos tempos de residência.	5%	10%	85%

Fonte: Adaptado de Brigwater (2001)

Embora existam biomassas com diferentes rendimentos, os valores apresentados nas tabelas de alguns autores são, em geral, semelhantes (Gómez, 2002; Nogueira *et al.*, 2003; Bridgwater, 2018).

No que se refere à transferência de calor no processo de pirólise, ela se dá através de três mecanismos principais: condução, convecção e radiação térmica, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Processo de pirólise em uma partícula de biomassa



Fonte: Adaptado de Basu (2013)

A convecção térmica ocorre devido ao contato da biomassa com os gases aquecidos no reator de pirólise. O calor é transferido por meio do movimento desses gases, que podem ser externos (provenientes da câmara de aquecimento) ou internos (gerados durante a própria pirólise). Esse mecanismo desempenha um papel fundamental na remoção dos produtos voláteis e na manutenção de um fluxo térmico adequado dentro do reator. À medida que a pirólise avança, parte da biomassa que se transforma em *biochar*, desenvolve uma estrutura porosa. Nessa fase, os gases aquecidos fluem através dos poros, transferindo calor não apenas para a superfície, mas também para o interior do material, garantindo um aquecimento mais uniforme.

A condução térmica é o principal mecanismo de transferência de calor no interior das partículas de biomassa, ocorrendo quando o calor se propaga por meio do contato direto entre as moléculas. Esse fenômeno é especialmente relevante na

fase inicial do aquecimento, quando a superfície da biomassa recebe calor e o transfere para o seu interior.

Já a radiação térmica torna-se mais significativa em sistemas de pirólise que operam em temperaturas elevadas. Nesse caso, o calor é transferido por meio de ondas eletromagnéticas emitidas tanto pelas paredes aquecidas do reator quanto pelas próprias partículas em processo de decomposição térmica. Esse mecanismo contribui para um aquecimento mais rápido e uniforme da biomassa, acelerando a degradação térmica.

2.3.1 *Biochar*

A origem do *biochar* está ligada às antigas práticas das populações indígenas, que, por meio da incorporação de fragmentos de cerâmica, ossos e outros vestígios ao solo, promoviam a melhoria da fertilidade do solo. Com o tempo, a decomposição desses materiais, aliada à ação natural, resultou em solos mais produtivos, favorecendo a agricultura de subsistência. Esse conhecimento empírico contribuiu para o desenvolvimento dos chamados solos de Terra Preta de Índio (TPI), que se destacam pela elevada fertilidade e são amplamente estudados por pesquisadores (Cochrane; Sanchez, 1982). Entretanto, os estudos sobre o *biochar* se expandiram para além da aplicação em solos, explorando seu potencial, tornando-se um material de interesse em diversas áreas científicas e tecnológicas.

O *biochar* também conhecido como biocarvão é um material sólido resultante da pirólise, caracterizado por seu elevado teor de carbono orgânico. Dependendo das condições de produção, o *biochar* pode apresentar diferentes formas estruturais, incluindo estruturas poliaromáticas e cíclicas, carbono amorfo, carbono pirolítico e, em alguns casos, estruturas grafiticas (Hassan *et al.*, 2020; Lehmann e Joseph, 2009).

Durante a pirólise da biomassa, parte dos hidrocarbonetos voláteis liberados podem se condensar no *biochar*. Além disso, substâncias húmicas, formadas pela decomposição parcial da matéria orgânica, enriquecem sua estrutura com carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre. Minerais como cálcio, potássio, magnésio e fósforo, presentes na biomassa original, também podem ser retidos, contribuindo para a fertilidade do solo. Além desses componentes, o *biochar* apresenta uma estrutura estável, o que dificulta a liberação de carbono na forma de CO₂, mesmo sob

condições ambientais e biológicas favoráveis, o que o torna um eficaz agente de sequestro de carbono (Lehmann e Joseph, 2009; Sohi *et al.*, 2010).

Qualquer fonte de biomassa, em princípio, pode ser utilizada na produção de *biochar*. No entanto, devido às variações na composição química e na estrutura desses materiais, juntamente com as condições específicas de pirólise, o produto resultante exibe características físicas e químicas distintas (Maia, 2011). Assim, a caracterização do *biochar* é importante, como o pH, o conteúdo de materiais voláteis, o teor de cinzas, a capacidade de retenção de água, a densidade aparente, o volume de poros, a análise elementar e a superfície específica (Sohi *et al.*, 2009).

Diversos estudos exploram as múltiplas aplicações do *biochar*, que pode ser utilizado na filtração e adsorção de contaminantes orgânicos e inorgânicos, na produção de produtos químicos e como aditivo para solos, além de contribuir para o sequestro de carbono. Além disso, estudos demonstram que a utilização do *biochar* como combustível sólido tem demonstrado grandes potenciais de aplicações, com um poder calorífico de cerca de 18 MJ kg⁻¹ (Amenaghawon *et al.*, 2021; Carvalho *et al.*, 2021; Kisiki *et al.*, 2015; Tomassoni *et al.*, 2023; Liu *et al.*, 2013; Pulka *et al.*, 2016; Bazargan, Rough, McKay, 2014). Assim, este estudo pode contribuir para práticas mais sustentáveis no gerenciamento de resíduos na indústria alimentícia, permitindo também a utilização dos *biochars* gerados na própria atividade industrial.

Para o uso eficiente do *biochar* como combustível sólido, é essencial considerar sua viabilidade econômica, a disponibilidade da biomassa e a existência de dados científicos robustos que comprovem seu desempenho.

2.4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL BOX-BEHNKEN

No processo de otimização multivariada, distinguem-se dois tipos de variáveis: as respostas e os fatores. As respostas correspondem às variáveis dependentes, cujos valores são influenciados pelos níveis dos fatores, que podem ser categorizados como qualitativos ou quantitativos (Ferreira *et al.*, 2007).

A metodologia de superfície de resposta consiste em um conjunto de métodos estatísticos e matemáticos que auxiliam na modelagem e análise de problemas em engenharia. O principal objetivo dessa técnica é otimizar a superfície de resposta, que é afetada por diversos parâmetros do processo. Além disso, essa metodologia permite

quantificar a relação entre os parâmetros de entrada controláveis e as superfícies de resposta geradas (Kwak, 2005).

Dentro desse contexto, o experimento Box-Behnken requer um número de experimentos determinado pela fórmula $N = k^2 + k + cp$, onde (k) representa o número de fatores e (cp) é o número de replicações do ponto central (Souza; Dos Santos; Ferreira, 2005). Dessa forma, o método Box-Behnken se destaca por exigir menos ensaios em comparação com outros designs experimentais, ao mesmo tempo em que mantém o número de fatores e possibilita uma análise estatística robusta. Essa abordagem não apenas minimiza o tempo e os recursos necessários para a realização das análises, mas também reduz os custos associados à execução de experimentos adicionais.

Outra vantagem desse planejamento é a ausência de combinações em que todos os fatores estejam simultaneamente nos níveis máximo ou mínimo, o que contribui para evitar experimentos realizados em condições extremas que poderiam resultar em dados insatisfatórios. Contudo, é importante ressaltar que a ausência de exploração de condições experimentais extremas pode ser uma desvantagem, dependendo dos objetivos e particularidades do experimento (Box, 1960; Ferreira *et al.*, 2007).

Além disso, sabendo que variáveis como temperatura, taxa de aquecimento e tempo de residência influenciam fortemente o produto final e suas características, evidencia-se a necessidade da aplicação do planejamento experimental na produção de *biochar* como combustível sólido, com o intuito de otimizar o processo, obter resultados mais eficazes e realizar uma análise detalhada dos parâmetros que influenciam essa produção, fundamentais para a implementação prática do estudo.

2.5 CUSTOS E VIABILIDADE ECONÔMICA DO *BIOCHAR*

A avaliação da viabilidade econômica é um aspecto central em pesquisas que envolvem a produção de *biochar*, uma vez que determina a aplicabilidade prática da tecnologia para além do ambiente laboratorial. Considerando que muitos trabalhos priorizam apenas a caracterização físico-química e energética do *biochar*, a análise de custos ainda aparece como um campo em desenvolvimento. De modo geral, a literatura aponta que muitos trabalhos enfrentam limitações para aplicar análises econômicas detalhadas, seja pela indisponibilidade de dados, pela escala laboratorial

das pesquisas ou pela complexidade de quantificar custos indiretos, como transporte, armazenamento e destinação de resíduos. Apesar disso, mesmo análises parciais — como aquelas voltadas ao consumo de energia elétrica no processo de pirólise — já representam avanços importantes, pois fornecem parâmetros de referência que podem orientar estudos futuros em maior escala.

Estudos recentes têm reforçado essa necessidade. Nematian; Keske; Ng'ombe (2021), por exemplo, destacam que a análise da viabilidade econômica do *biochar* deve ser considerada em paralelo aos seus benefícios agrônômicos e ambientais, mostrando que existe uma faixa de custo viável para produção dos combustíveis sólidos. Esse tipo de avaliação ilustra que a pirólise pode ir além da simples conversão térmica, constituindo-se como uma alternativa integrada e sustentável, cujo valor não está apenas no material produzido, mas também na redução de custos associados a outros insumos e práticas convencionais.

Embora diversos estudos apontem que a produção de *biochar* ainda enfrenta barreiras econômicas, principalmente em função de custos de transporte, armazenamento e operação em escala industrial (Sahoo *et al.*, 2021; Campion *et al.*, 2023), é importante destacar que esse cenário se modifica quando o *biochar* é produzido a partir de resíduos já existentes nos processos produtivos. Em situações industriais, esses resíduos muitas vezes geram despesas de destinação e tratamento, de modo que sua conversão em *biochar* pode representar não apenas uma alternativa de valorização, mas também uma economia indireta. Além disso, o *biochar* pode ser aproveitado em sistemas já presentes, como caldeiras e fornalhas, contribuindo para a autossuficiência energética e reduzindo a dependência de combustíveis fósseis. Nesse sentido, a avaliação da viabilidade econômica torna-se essencial, pois permite identificar casos em que a integração do *biochar* ao processo produtivo pode transformar um passivo ambiental em um ativo energético.

Portanto, ainda que a análise de custos em muitos trabalhos se limite a aspectos parciais, como o consumo energético, ela representa um passo inicial relevante para a consolidação do *biochar* como alternativa viável. A viabilidade econômica do processo pode ser significativamente aumentada quando se considera o aproveitamento de co-produtos, como o bio-óleo e o biogás, que podem gerar receitas adicionais e reduzir custos operacionais. O avanço em direção a análises mais completas, que incluam variáveis logísticas, de escala industrial e de aproveitamento energético, é fundamental para demonstrar o real potencial

econômico da tecnologia e garantir que o *biochar* se estabeleça como uma solução sustentável e aplicável em diferentes contextos produtivos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 BIOMASSAS

As biomassas utilizadas neste estudo foram fornecidas por uma indústria alimentícia localizada no estado do Paraná. Foram disponibilizados 2 kg de cada tipo de resíduo solicitado, incluindo placas de wafer com diferentes níveis de recheio: wafer com mais recheio (W+), wafer com menos recheio (W-) e chocolate ao leite.

3.2 PRODUÇÃO DO *BIOCHAR*

Os *biochars* foram produzidos no Laboratório do Grupo de Pesquisas em Macromoléculas e Interfaces (GPMIn) da Universidade Federal do Paraná, numa mufla digital (EDG Modelo F-7000 10 P) com controle de temperatura, tempo, taxa de aquecimento e sob fluxo de nitrogênio constante. As temperaturas selecionadas para o processo, baseadas na análise termogravimétrica, foram de 350, 450 e 550 °C, com tempos de residência de 0, 60 e 120 minutos. A taxa de aquecimento foi fixada em 10 °C/min.

3.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL BOX-BEHNKEN

O experimento foi conduzido com base na metodologia de Box-Behnken, envolvendo três fatores independentes: temperatura, tempo de residência e tipo de biomassa, e considerando o poder calorífico e o rendimento como variáveis resposta. Esta abordagem permitiu uma análise sistemática para determinar a melhor combinação desses parâmetros que otimize a produção de *biochar* destes resíduos alimentícios. Os valores de cada fator foram codificados como +1, 0 e -1 no software STATGRAPHICS Plus 5.0. Entretanto, como o foco principal deste estudo foi a avaliação do potencial energético do *biochar*, a variável relacionada ao poder calorífico recebeu maior aprofundamento nas análises estatísticas, sendo discutida de forma mais detalhada em relação ao rendimento.

A Tabela 3 apresenta todas as configurações experimentais correspondentes, mantendo a atmosfera de nitrogênio com fluxo constante.

Tabela 3 – Parâmetros do planejamento experimental Box-Behnken

Código no planejamento	Temperatura de pirólise (°C)	Tempo de pirólise (min)	Tipo de biomassa
-1	350	0	W+
0	450	60	Chocolate
1	550	120	W-

Fonte: Aatoria Própria (2025)

O planejamento experimental foi estruturado com 3 fatores e 3 pontos centrais, com experimentos replicados no ponto central, resultando em um total de 15 experimentos (N), conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Codificação das variáveis do planejamento experimental

N	Tempo (min)	Temperatura (°C)	Tipo de biomassa
1	1	0	1
2	1	-1	0
3	1	0	-1
4	-1	1	0
5	-1	-1	0
6	-1	0	-1
7	0	1	1
8	0	1	-1
9	0	-1	1
10	1	1	0
11	-1	0	1
12	0	-1	-1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

Fonte: Aatoria Própria (2025)

3.4 CARACTERIZAÇÃO DAS BIOMASSAS E *BIOCHARS*

A caracterização das biomassas envolveu análises do teor de umidade, cinzas, termogravimétricas e a determinação do poder calorífico superior (PCS). Os *biochars* selecionados com base nos resultados do planejamento experimental foram submetidos a avaliações de rendimento em massa, PCS, densificação energética, rendimento energético, análise elementar, teor de umidade, cinzas, estimativa do poder calorífico inferior (PCI) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Durante os ensaios das análises termogravimétricas (TG), foi utilizada atmosfera de nitrogênio com fluxo de 50mL.min⁻¹, operando a uma taxa de aquecimento de 10 °C.min⁻¹. O procedimento de aquecimento ocorreu na faixa de temperatura entre 25 °C e aproximadamente 800 °C. As amostras foram secas em estufa a 105 °C por 24 horas para remover a umidade antes de serem submetidas à esta análise. A análise foi realizada utilizando um equipamento NETZSCH STA 449 F3, da Central Analítica do Departamento de Química da Universidade Federal do Paraná (UFPR).

Para a determinação do teor de umidade (U) foi utilizada uma estufa digital (SX1.1DTMS) com circulação de ar, no laboratório do GPMin, a uma temperatura de 105 °C, até que a massa se estabilize, de acordo com a norma ASTM 1762-84 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2013). O resultado foi obtido através da Equação 1.

$$U(\%) = \left(\frac{A - B}{A} \right) \times 100 \quad (1)$$

Onde, A é a massa inicial (g) e B é a massa do material (g) após a secagem a 105 °C.

A análise elementar foi realizada utilizando um analisador elementar, que permite a determinação dos percentuais de carbono (C), hidrogênio (H) e nitrogênio (N) presentes nas amostras. Nesse processo, as amostras são submetidas à combustão em uma atmosfera de oxigênio puro, gerando gases como CO₂, H₂O e NO_x, quantificados por um detector de condutividade térmica (TCD). Essas análises realizaram-se na Central Analítica do Instituto de Química (USP).

A determinação do poder calorífico superior (PCS) envolveu o uso de um calorímetro do modelo IKA C5000 realizado no laboratório de energia de biomassa da UFPR, enquanto o poder calorífico inferior (PCI) foi calculado aplicando a Equação 3, conforme descrito por Doat (1977).

$$PCI \left(\frac{Kcal}{Kg} \right) = PCS - 5,72 \times (9 + H + U) \quad (3)$$

A determinação de cinzas foi realizada conforme a norma ASTM E1755-24 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2024) no laboratório do GPMin. O procedimento inicial envolveu a calcinação dos cadinhos de porcelana na mufla, onde previamente foram calcinados a 575 ± 25 °C, por 3 horas. Em seguida, os cadinhos foram resfriados em dessecador por 1 hora e suas massas foram medidas. Os cadinhos foram então retornados à mufla por mais 1 hora à mesma temperatura, e a determinação da massa foi repetida até que a variação entre as determinações indicasse que a massa estava constante.

Determinada as massas dos cadinhos, as amostras, previamente secas a 105 °C, foram transferidas para os cadinhos. Estes foram colocados novamente na mufla a 575 ± 25 °C e mantido a essa temperatura por 3 horas. Após o resfriamento em dessecador, as massas dos cadinhos com as amostras foram determinadas. O processo foi repetido, com os cadinhos sendo submetidos a novos ciclos na mufla, até que a massa final se estabilizasse, determinando a massa final. Esse experimento foi realizado em triplicata para cada amostra. A Equação (4) foi aplicada para calcular o teor de cinzas (TC).

$$TC = \left(\frac{m_f - m_{ca}}{m_i - m_{ca}} \right) \times 100 \quad (4)$$

Onde, m_i é a massa inicial da amostra + cadinho (g), m_f é a massa final da amostra + cadinho (g) e m_{ca} é a massa do cadinho (g).

O rendimento em massa (RM) dos *biochars* foi calculado dividindo a massa final (m_f) do *biochar* pela massa inicial (m_i) da biomassa (Equação 5).

$$RM (\%) = \frac{m_f}{m_i} \times 100 \quad (5)$$

Para avaliar a eficiência do processo de produção de *biochar* em termos energéticos, foram utilizadas as equações 6 e 7, propostas por Li e Chen (2018). A densificação energética representa o aumento do poder calorífico do *biochar* em relação à biomassa bruta:

$$\text{Densificação energética (\%)} = \left(\frac{\text{PCS do biochar}}{\text{PCS da biomassa}} \right) \times 100 \quad (6)$$

Já o rendimento energético (RE) é uma métrica que combina o rendimento em massa do processo (quantidade de *biochar* produzido em relação à biomassa inicial) com a densificação energética:

$$\text{RE (\%)} = \text{RM (\%)} \times \text{densificação energética (\%)} \quad (7)$$

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi empregada para analisar a morfologia, a distribuição do tamanho das partículas e a homogeneidade das amostras. As imagens foram obtidas utilizando o equipamento JEOL JSM 6360 – LV, operando a uma voltagem de 15 kV em alto vácuo, com um detector de elétrons secundários (SE). Para a obtenção das imagens, as amostras foram fixadas em stubs com fita adesiva de carbono e submetidas à metalização por sputtering, aplicando uma fina camada de ouro para garantir a condutividade da superfície. Essas análises foram realizadas no Centro de Microscopia Eletrônica (CME) da UFPR.

3.5 ESTUDO DO POTENCIAL DOS *BIOCHARS* PARA USO COMO COMBUSTÍVEL

As características como combustível sólido dos *biochars* das biomassas do presente estudo foram comparadas com as informações encontradas na literatura referentes ao bagaço de cana-de-açúcar. Essa comparação é relevante para a indústria em questão, que já está desenvolvendo um projeto relacionado ao uso dessa biomassa como combustível sólido.

3.6 CUSTOS

Foi avaliado o consumo de energia elétrica durante o processo de pirólise, levando em consideração o valor da tarifa, a fim de calcular o custo da carbonização dos resíduos alimentícios. Para determinar o custo de carbonização de massa de *biochar* produzida por ciclo e estimar o custo para produzir 1 quilo de *biochar*, foram aplicadas as Equações 8, 9 e 10.

$$C = P \times t \quad (8)$$

$$CUSTO = C \times \frac{R\$}{kWh} \quad (9)$$

$$CUSTO' = \frac{CUSTO}{MB} \quad (10)$$

Onde: C é o consumo (kWh); P é a potência (W); t é o tempo (h); CUSTO é o custo de carbonização de massa de *biochar* produzida por ciclo; CUSTO' é a estimativa do custo por quilo de *biochar* produzido e MB é a massa de *biochar* produzido por ciclo.

Além disso, foi estimado o custo associado ao bagaço de cana-de-açúcar, considerando o preço do material. Da mesma forma, foram analisados os custos relacionados à gestão dos resíduos alimentícios. Essa análise permitiu comparar os custos associados aos resíduos e a compra do bagaço de cana de açúcar com o custo de produção de *biochar* em estudo. Dessa forma, foi possível verificar a viabilidade econômica da substituição do bagaço de cana-de-açúcar pelo *biochar* como fonte de energia em caldeiras industriais.

4 RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS BIOMASSAS

4.1.1 Teor de umidade e cinzas

Um elevado teor de umidade na biomassa é prejudicial, visto que quanto maior a quantidade de água presente, mais energia é necessária para sua remoção. Vale *et al.* (2011) afirmam que níveis de umidade superiores a 7% podem comprometer a eficiência da combustão. Em contrapartida, Seye *et al.* (2008) indicam que um teor de umidade de até 14% pode causar pouca ou nenhuma dificuldade no processo de combustão.

Os resultados dos teores de umidade e cinzas das biomassas em estudo podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultado do teor de umidade e cinzas

Biomassa	Teor de umidade (%)	Teor de cinzas (%)
Chocolate	1,23 ± 0,10	1,17 ± 0,02
W-	1,77 ± 0,14	1,64 ± 0,12
W+	1,56 ± 0,01	0,96 ± 0,01

Fonte: Autoria própria (2024)

No que diz respeito ao teor de cinzas, valores inferiores a 2% sugerem que as biomassas são adequadas para processos termoquímicos, uma vez que altos níveis de cinzas podem reduzir a energia disponível no combustível e causar problemas operacionais, pois as cinzas correspondem à fração da biomassa que permanece após a combustão (Mckendry, 2002).

Comparando os resultados obtidos com os valores indicados pelos autores, verifica-se que os níveis encontrados estão abaixo dos limites mencionados, o que reforça a adequação das biomassas para aplicação em processos termoquímicos.

Os resultados obtidos para o chocolate são próximos dos relatados por Du *et al.* (2014), que identificaram um teor de cinzas de 1,29% e um teor de umidade de 0,98%, alinhando-se com os valores encontrados neste estudo. Em contraste, Joel *et*

al. (2013) registraram valores de umidade mais elevados para essa biomassa, alcançando 5,62%, com um teor de cinzas de 2,15%. Além disso, Barbosa *et al.* (2020) analisaram diversas marcas e constataram uma variação no teor de umidade entre 2,55% e 19,23%, sugerindo que essas diferenças podem ser atribuídas à absorção de umidade durante o transporte ou armazenamento inadequado.

De acordo com Feliz (2013), a umidade ideal para o wafer varia de 0,7% a 2,0%. Os resultados obtidos para os wafers nesta pesquisa, além de estarem de acordo com o indicado por Feliz, são próximos aos valores registrados por Stroher *et al.* (2012), cuja pesquisa observou uma variação na umidade dos wafers entre 0,84% e 1,33% e com teores de cinzas entre 0,87% e 0,90%.

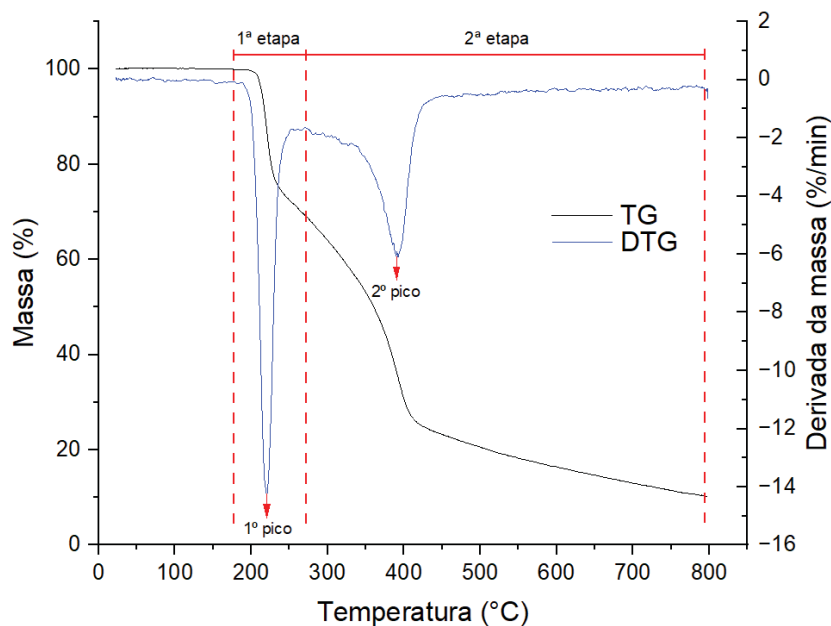
Ao analisar os resultados das análises de umidade e teor de cinzas dos biscoitos wafer, observa-se que eles não diferem consideravelmente dos valores obtidos para o chocolate, embora haja pequenas variações. Entre os biscoitos, o W+ apresentou teores de umidade e cinzas inferiores ao W-, enquanto, em comparação ao chocolate, o W+ exibiu um teor de umidade mais elevado e um teor de cinzas menor.

4.1.2 Análise Termogravimétrica (TG)

A TG das biomassas permitiu avaliar seu comportamento térmico, fornecendo informações sobre a estabilidade, degradação e eficiência na conversão termoquímica, sendo um resultado importante para a formação de *biochars*. Na Figura 11 são demonstradas as curvas termogravimétricas e suas derivadas (DTG) obtidas para o chocolate ao leite.

A interpretação dos dados foi conforme a norma ASTM E 2550-11. Para melhor interpretação adotou-se que a temperatura inicial (T_i) é definida como a temperatura mínima em que se observa o começo da variação de massa. Já a temperatura final (T_f) corresponde à menor temperatura que indica o término do processo responsável pela variação de massa. Os inícios das inflexões da curva da DTG podem ser usados para ajudar a identificar a T_i e a T_f .

Figura 11 - Curva de TG e DTG sob atmosfera de nitrogênio com fluxo de 50mL/min, operando a uma taxa de aquecimento de 10°C/min do chocolate



Fonte: Autoria Própria (2024)

Ao analisar as curvas nos gráficos de TG e DTG, nota-se que a decomposição ocorre em duas etapas distintas, dentro de uma faixa de temperatura de 175 a 800 °C. A primeira etapa de decomposição do chocolate atinge seu pico de perda de massa (12,15%) por volta de 220 °C. Já a segunda etapa registra a maior taxa de perda de massa (64,57%) a 392 °C. A perda rápida de massa do chocolate se conclui aos 455 °C, seguida por uma decomposição mais lenta, que se estende até 800 °C.

A primeira etapa, entre 175 e 271 °C, resulta em uma perda de massa de 30,81%, enquanto a segunda, entre 271 e 800 °C, gera uma perda de massa de 58,97%. Du *et al.* (2014), em sua pesquisa avaliando o chocolate ao leite, também identificaram duas fases distintas de decomposição. Eles relataram que a primeira fase ocorreu entre 190 e 300 °C, durante a qual alcaloides como teobromina e cafeína são liberados, juntamente com a decomposição do açúcar, resultando na emissão de ácidos, CO₂ e água. Na segunda fase, que ocorreu entre 300 e 518 °C, a manteiga de cacau e as proteínas se decompõem, liberando grande quantidade de voláteis, incluindo ésteres, ácidos, amidas, fenóis, CH₄, CO₂, CO e água. Polifenóis como catequina e procianidinas se decompõem ao longo de ambas as fases.

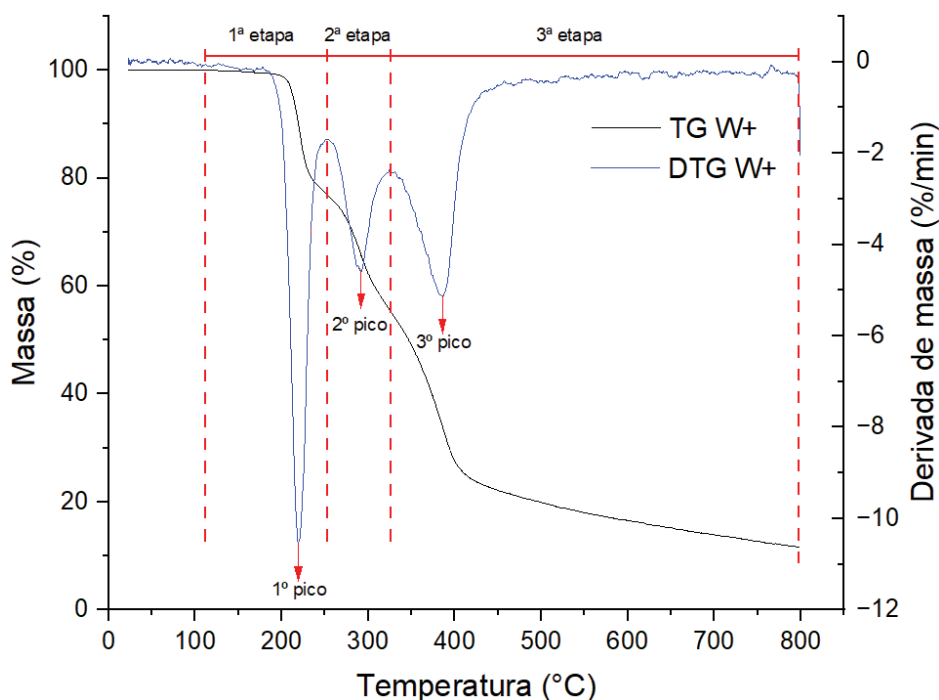
Por outro lado, o estudo de Ostrowska-Ligęza *et al.* (2018) propôs uma subdivisão da decomposição térmica do chocolate ao leite em três estágios distintos:

o primeiro entre 50 e 230 °C, o segundo de 230 a 500 °C, e o terceiro de 500 a 700 °C. Materazzi *et al.* (2014) estudaram a decomposição térmica do chocolate amargo e igualmente identificaram três estágios: o primeiro entre 50 e 210 °C, o segundo de 210 a 350 °C, e o terceiro de 350 a 700 °C. Ambos os autores associaram esses estágios às características das matérias-primas dos chocolates, com a decomposição inicial do açúcar, seguida pela degradação do licor de cacau, e, por fim, a perda de massa da manteiga de cacau.

Apesar do estudo focar em resíduos, as faixas de temperatura observadas são próximas das relatadas pelos autores citados, o que sugere que os processos de degradação observados incluem a decomposição do açúcar, seguida pela degradação de gorduras, como o licor, a manteiga de cacau, e proteínas do chocolate.

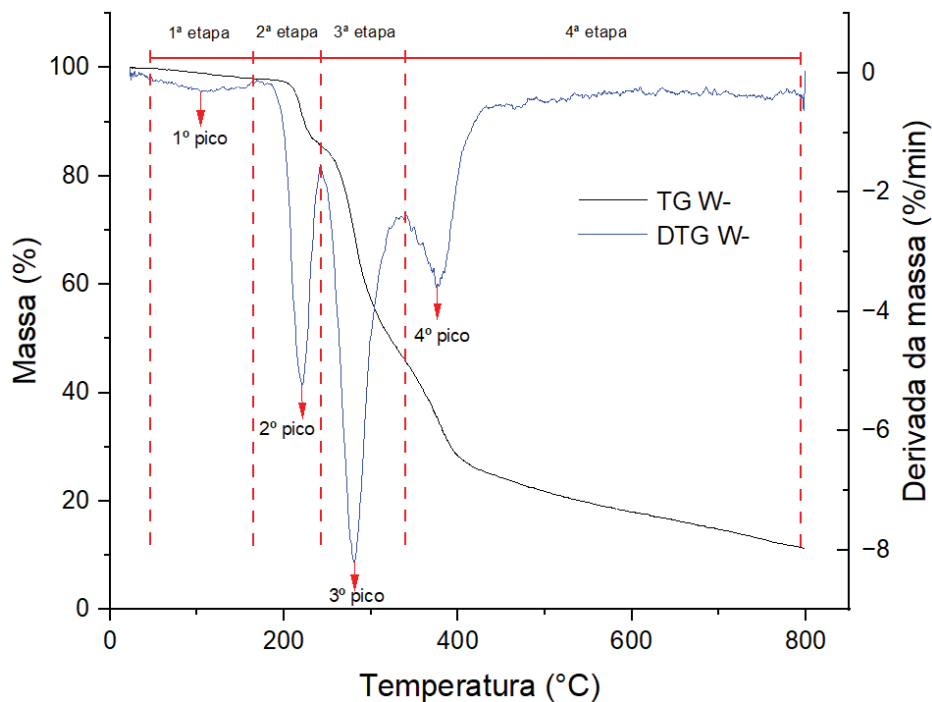
Para a biomassa de wafer, foram realizadas duas análises termogravimétricas: uma para o wafer com maior quantidade de recheio (W+), conforme mostrado na Figura 12, e outra para o wafer com menor quantidade de recheio (W-), apresentada na Figura 13.

Figura 12 - Curva de TG e DTG sob atmosfera de nitrogênio com fluxo de 50mL/min, operando a uma taxa de aquecimento de 10°C/min dos W+



Fonte: Autoria Própria (2024)

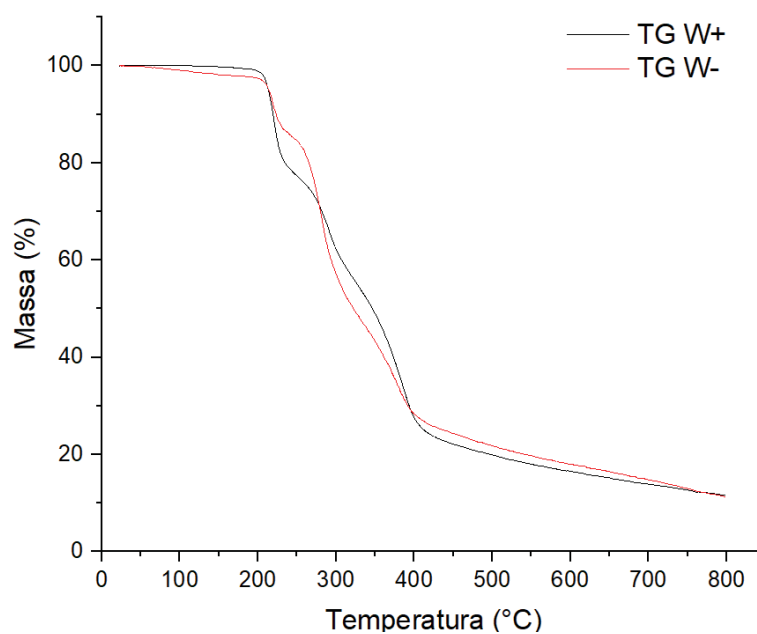
Figura 13 - Curva de TG e DTG sob atmosfera de nitrogênio com fluxo de 50mL/min, operando a uma taxa de aquecimento de 10°C/min dos W-



Fonte: Autoria Própria (2024)

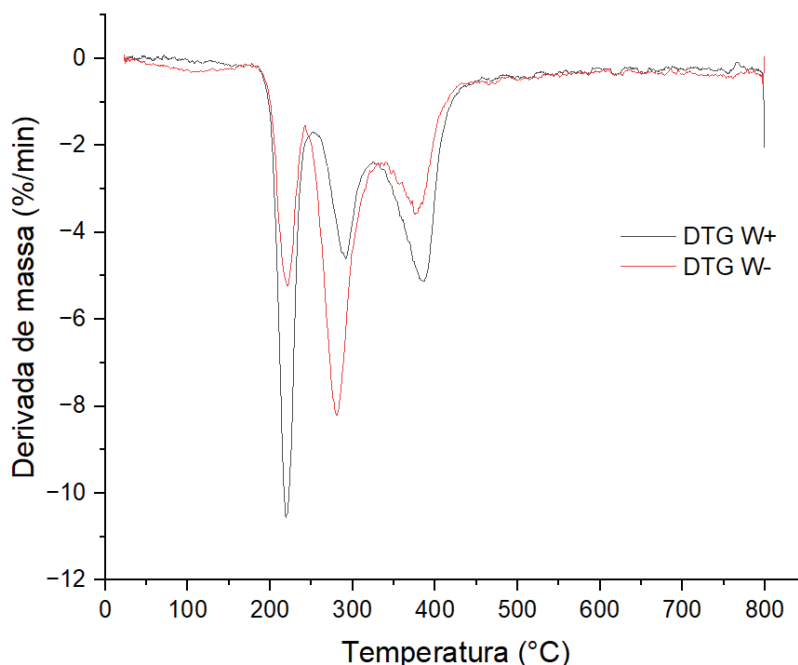
Como as características químicas de ambas as amostras são semelhantes, foi possível comparar as curvas TG e DTG, mostrada na Figura 14 e na Figura 15.

Figura 14 - Curva de TG sob atmosfera de nitrogênio com fluxo de 50mL/min, operando a uma taxa de aquecimento de 10°C/min dos biscoitos wafers



Fonte: Autoria Própria (2024)

Figura 15 - Curva de DTG sob atmosfera de nitrogênio com fluxo de 50mL/min, operando a uma taxa de aquecimento de 10°C/min dos biscoitos wafers



Fonte: Autoria Própria (2024)

Ao examinar as curvas TG e DTG, verifica-se que a decomposição do W+ ocorre em três etapas distintas, dentro de uma faixa de temperatura de 111 a 800 °C. Em contraste, o W- apresenta decomposição em quatro etapas distintas, entre 43 e 800°C. A perda rápida de massa dos biscoitos wafer se conclui aos 446 °C, seguida por uma decomposição mais lenta, que se estende até 800 °C.

A primeira etapa de decomposição do W+ ocorre entre 111 e 251 °C, resultando em uma perda de massa de 22,96%. Em comparação, a primeira etapa de decomposição do W- ocorre entre 43 e 161 °C, com uma perda de massa de 2,01%.

Na segunda etapa, a decomposição do W+ ocorre entre 251 e 324 °C, acompanhada por uma perda de massa de 21,49%. Por sua vez, a segunda etapa de decomposição do W- ocorre entre 161 e 242 °C, com uma perda de massa de 12,47%. A terceira e última etapa de decomposição do W+ abrange a faixa de 324 a 800 °C, resultando em uma perda de massa de 43,99%. Em relação ao W-, a terceira etapa ocorre entre 242 e 339 °C, com uma perda de massa de 39,62%. Por fim, o W- apresenta uma quarta etapa de decomposição, ocorrendo entre 339 e 800 °C, durante a qual observa-se uma perda de massa de 34,64%.

Para uma melhor visualização, os valores são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Etapas de decomposição térmica dos resíduos alimentícios

Tipo de biomassa	Etapa	T _i (°C)	T _f (°C)	Perda de massa (massa %)	Resíduo (massa %)
Chocolate	1 ^a	175	271	30,81	10,22
	2 ^a	271	800	58,97	
W+	1 ^a	111	251	22,96	11,56
	2 ^a	251	324	21,49	
	3 ^a	324	800	43,99	
W-	1 ^a	43	161	2,01	11,26
	2 ^a	161	242	12,47	
	3 ^a	242	339	39,62	
	4 ^a	339	800	34,64	

Fonte: Autoria Própria (2024)

Observa-se que o W- continha uma quantidade residual de água, evaporada na primeira fase, relacionada à remoção da umidade absorvida durante o armazenamento, além da decomposição de compostos aromáticos de sabor presentes nos biscoitos (Karaca Açari, 2021).

Na primeira etapa do W+, ocorre a degradação dos compostos aromáticos de sabor, juntamente com os ingredientes que compõem o chocolate, como o açúcar, teobromina e cafeína. Esses mesmos componentes são liberados na segunda fase do W- (Du *et al.*, 2014; Karaca Açari, 2021). Nesta fase, era esperado que as amostras com mais recheio tivessem uma maior perda de massa na temperatura correspondente à degradação do açúcar, evidenciado pelo pico no gráfico de DTG.

Na segunda etapa do W+, observa-se que o gráfico de DTG, quando comparado ao gráfico da terceira fase do W-, apresenta um pico menor de perda de massa. Isso pode ser justificado pelo fato de que esta etapa envolve a degradação das estruturas de carboidratos e amidos dos biscoitos, e os biscoitos com menos recheio possuem maior quantidade de amidos (Amin *et al.*, 2018).

Na terceira etapa do W+ e na quarta fase do W-, o licor, a manteiga de cacau e as proteínas se decompõem, justificando novamente o pico maior para o wafer com

mais recheio, que contém mais chocolate e, conseqüentemente, mais gorduras (Du *et al.*, 2014; Materazzi *et al.*, 2014; Ostrowska-Ligeza *et al.*, 2018).

Assim pode-se concluir que a TG do chocolate, W+ e W-, revela perfis térmicos distintos, com diferentes temperaturas de degradação. Essa diversidade de comportamentos térmicos destaca a importância de estudar diversas biomassas, uma vez que cada uma pode resultar em produtos carbonizados com características e propriedades distintas, otimizando assim a eficiência dos processos termoquímicos.

4.1.3 Poder calorífico

Os resultados da análise energética das biomassas estudadas estão apresentados na Tabela 7. Em geral, os valores obtidos na bomba calorimétrica devem se aproximar dos poderes calóricos informados nas embalagens, embora diferenças sejam esperadas, uma vez que o método experimental mensura a energia total liberada pela combustão dos resíduos alimentícios, enquanto os rótulos indicam apenas a fração de energia efetivamente metabolizável.

Tabela 7 – Poder calorífico das biomassas analisadas

Biomassa	Poder calorífico (MJ kg⁻¹)	Poder calórico (kcal g⁻¹)
Chocolate	24,423	5,48
W-	22,438	5,13
W+	22,651	5,20

Fonte: Autoria Própria (2024)

No caso do chocolate, a embalagem informa 137 kcal em 25 g (5,48 kcal g⁻¹), correspondendo a aproximadamente 22,93 MJ kg⁻¹. O valor experimental obtido foi 24,423 MJ kg⁻¹, ou seja, cerca de 6,5% superior ao indicado na embalagem. Para o W+, a porção de 30 g apresenta 156 kcal (5,2 kcal g⁻¹), o que corresponde a 21,73 MJ kg⁻¹. O valor medido experimentalmente foi 22,651 MJ kg⁻¹, uma diferença de aproximadamente 4,2%. Já o W- possui, na porção de 30 g, 154 kcal (5,13 kcal g⁻¹), resultando em cerca de 21,45 MJ kg⁻¹. O valor experimental foi de 22,438 MJ kg⁻¹, evidenciando uma variação de aproximadamente 4,6%.

Essas variações, refletem as diferenças entre a energia total liberada na combustão e a energia metabolizável, além do fato de que os resíduos da produção podem apresentar composições variadas, com proporções de componentes que diferem das informadas nas embalagens.

Na Tabela 8, tem-se a comparação dos valores de PCS de outras biomassas encontradas na literatura. Observa-se que os valores encontrados nesse trabalho são superiores aos encontrados, evidenciando o potencial da utilização desses resíduos como fonte de energia. Vale ressaltar, que esse resultado é relevante, pois foi obtido antes do processo de conversão em *biochar*, demonstrando o significativo potencial energético desses resíduos.

Tabela 8 – Poder calorífico de outras biomassas

Biomassa	Poder calorífico (MJ kg-1)	Referência
Borra de café	21,92	Dos Santos <i>et al.</i> (2020)
Maravalhas de pinus	20,35	De Paula Protásio <i>et al.</i> (2011)
Maravalhas de eucalipto	19,11	De Paula Protásio <i>et al.</i> (2011)
Resíduo de maravalha	19,47	Fehlauer (2013)
Resíduo de MDF	19,60	Fehlauer (2013)
Casca de arroz	16,17	De Paula Protásio <i>et al.</i> (2011)
Polpa celulósica de bambu	17,54	De Paula Protásio <i>et al.</i> (2011)
Bagaço de cana-de-açúcar	16,38	Oliveira <i>et al.</i> (2023)
Bagaço de cana-de-açúcar	18,16	Lizcano (2015)
Bagaço de cana-de-açúcar	18,25	Da Silva e Dos Santos (2008)
Bagaço de cana-de-açúcar	16,87	Girão (2016)
Colheita do milho	18,89	De Paula Protásio <i>et al.</i> (2011)

Fonte: Autoria Própria (2024)

Entre as biomassas utilizadas na geração de energia, o bagaço de cana-de-açúcar é amplamente estudado devido à sua disponibilidade e poder calorífico. Os valores de PCS para o bagaço de cana variam dentro de uma faixa de 16 a 18 MJ kg⁻¹. Ripoli *et al.* (1991) explicam essa estabilidade, afirmando que o PCS do bagaço de cana se mantém semelhante mesmo quando coletado em diferentes regiões. Em relação ao presente trabalho, por se tratar de um resíduo da indústria alimentícia, pode não apresentar essa estabilidade.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS *BIOCHARS*

4.2.1 Rendimento em massa

A Tabela 9 apresenta os resultados do rendimento do *biochar* sob diferentes condições de pirólise, evidenciando a influência dos parâmetros processuais. Esse comportamento já era esperado, pois temperaturas mais elevadas resultam em uma maior degradação térmica do material, reduzindo o rendimento final. Além disso, esse resultado corrobora com os apresentados nas TGs das biomassas, onde quanto maior a temperatura, maior foi a perda de massa.

Tabela 9 - Rendimento em massa do *biochar* sob diferentes condições de pirólise

N	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Rendimento (%)
1	450	120	28
2	350	120	52
3	450	120	25
4	550	0	48
5	350	0	82
6	450	0	60
7	550	60	25
8	550	60	20
9	350	60	56
10	550	120	22
11	450	0	58
12	350	60	56

N	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Rendimento (%)
13	450	60	27
14	450	60	25
15	450	60	27

Fonte: Autoria Própria (2025)

A alta variabilidade observada nos rendimentos do *biochar* neste estudo dificultou a comparação direta com outros trabalhos da literatura. No entanto, é possível destacar alguns resultados encontrados por alguns autores. Almeida (2019), ao avaliar diferentes condições de pirólise para o lodo de esgoto, obteve um rendimento máximo de 64,99%. Já Dos Santos *et al.* (2021) estudaram a pirólise da casca de tinguí e verificaram um rendimento máximo de 33,9%. Além disso, Conz (2015) analisou diferentes biomassas em diversas temperaturas, encontrando valores de rendimento de 59,60% para dejetos de galinha, 41,49% para palha de cana-de-açúcar, 49,63% para casca de arroz e 42,60% para serragem.

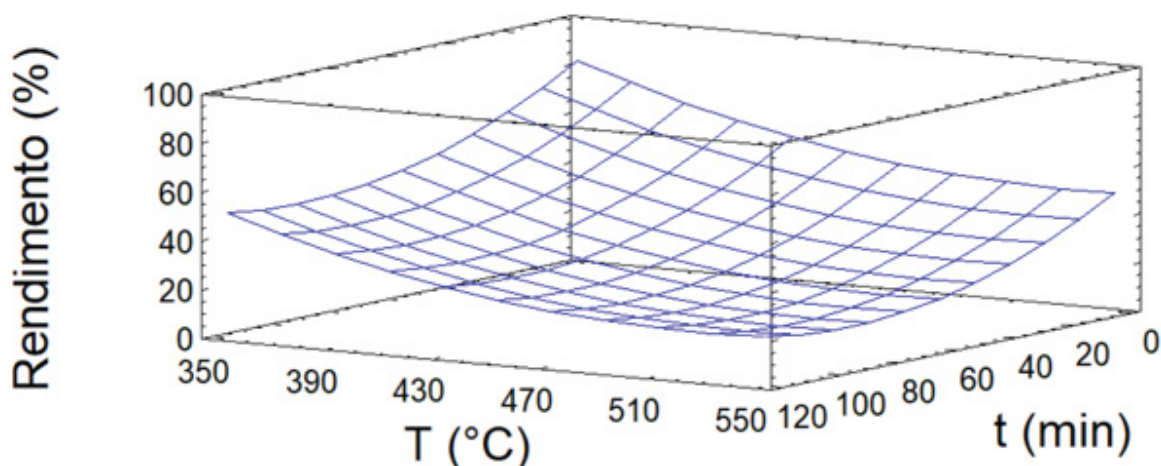
No que se refere a outros estudos relacionados a cana-de-açúcar, Galvão (2023) encontrou um rendimento de 37,8% para o bagaço. Marques *et al.* (2022) estudaram a palha de cana-de-açúcar em um intervalo de temperatura baixo, de 200 a 350 °C, resultando em rendimentos que variaram de 28,11% a 85,01%. Além disso, Pires *et al.* (2018) avaliaram a palha de cana-de-açúcar em diferentes temperaturas, obtendo o maior rendimento de 55,16%. Esses dados demonstram que o rendimento do *biochar* pode variar dependendo da biomassa utilizada e das condições do processo, assim novos estudos com diferentes biomassas e condições experimentais são relevantes.

Realizou-se a análise estatística do rendimento do *biochar*, permitindo a determinação de um modelo matemático (Equação 11) para descrever seu comportamento. O ajuste dos dados resultou em um coeficiente de determinação (R^2) de 99,73%, indicando que a maior parte da variabilidade dos valores experimentais é explicada pelo modelo proposto. Esse alto grau de correlação confirma a adequação da equação ajustada para representar a influência das variáveis independentes sobre o rendimento.

$$\begin{aligned}
 \text{Rendimento} = & 340,941 - 0,781389 \times t - 1,0945 \times T - 5,57 \times tb \quad (11) \\
 & + 0,00384838 \times t^2 + 0,00014875 \times t \times T \\
 & + 0,0174167 \times t \times tb + 0,00102417 \times T^2 \\
 & + 0,011575 \times T \times tb + 2,30417 \times tb^2
 \end{aligned}$$

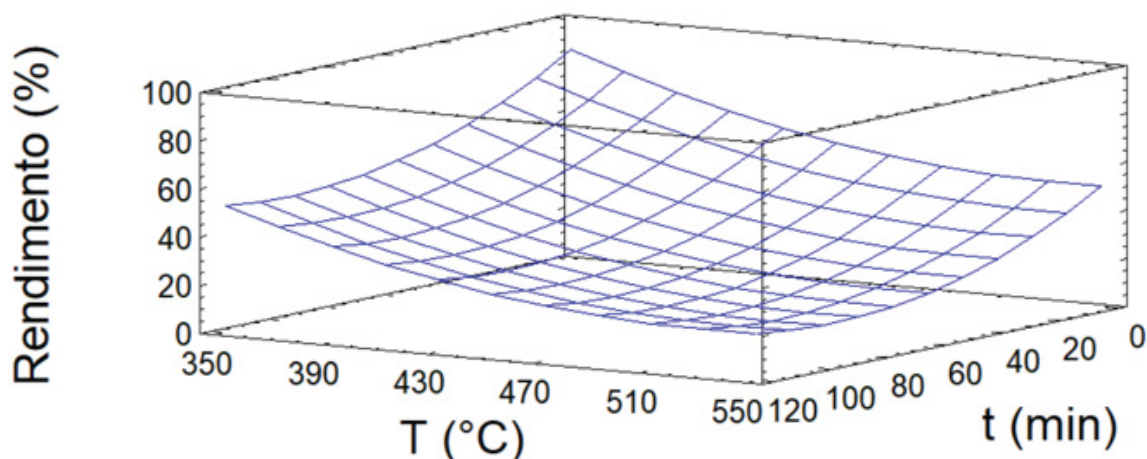
A partir do modelo ajustado, foi possível plotar os gráficos de superfície de resposta (Figura 16, Figura 17 e Figura 18). Observa-se que em ambos os gráficos, menores temperaturas e menores tempos resultam em um maior rendimento, como evidenciado nos tratamentos 5 (350 °C, 0 min, 82%) e 9 (350 °C, 60 min, 56%). Por outro lado, maiores temperaturas e maiores tempos levaram a um menor rendimento, como observado nos tratamentos 7 (550 °C, 60 min, 25%) e 10 (550 °C, 120 min, 22%). Além disso, quando a temperatura foi elevada, mas o tempo de residência foi reduzido, o rendimento também foi superior ao das condições de alta temperatura e tempo prolongado, como visto no tratamento 4 (550 °C, 0 min, 48%).

Figura 16 - Gráfico de superfície de resposta do resíduo de chocolate



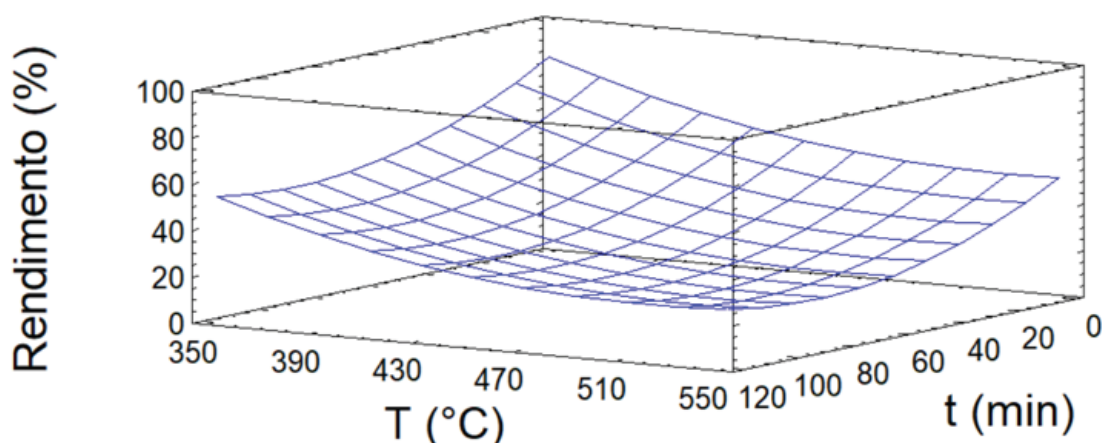
Fonte: Autoria Própria (2025)

Figura 17 - Gráfico de superfície de resposta do resíduo de W+



Fonte: Autoria Própria (2025)

Figura 18 - Gráfico de superfície de resposta do resíduo de W-



Fonte: Autoria Própria (2025)

4.2.2 Poder calorífico

O poder calorífico dos *biochars* gerados é um parâmetro fundamental para sua aplicação como fonte energética, influenciando diretamente a combustão e a viabilidade energética do material. De acordo com a Tabela 10, observa-se que a menor média de PCS foi obtida no tratamento 5, com um valor de $27,371 \text{ MJ kg}^{-1}$, correspondente à biomassa de chocolate processada a $350 \text{ }^{\circ}\text{C}$, sem tempo de residência.

Por outro lado, o maior valor médio de PCS foi $32,688 \text{ MJ kg}^{-1}$, registrado para a biomassa de chocolate tratada a $550 \text{ }^{\circ}\text{C}$, também sem tempo de residência. Além

disso, destaca-se que a segunda maior média de PCS foi observada para a biomassa W+ tratada a 550 °C com um tempo de residência de 60 minutos. Já para a biomassa W-, o maior PCS obtido foi 30,591 MJ kg⁻¹, sob as condições de 550 °C e 60 minutos de residência.

Tabela 10 - Poder calorífico do *biochar* sob diferentes condições de pirólise

N	Tempo (min)	Temperatura (°C)	PC (MJ kg⁻¹)
1	120	450	28,872
2	120	350	31,598
3	120	450	30,358
4	0	550	32,688
5	0	350	27,371
6	0	450	31,093
7	60	550	30,591
8	60	550	32,202
9	60	350	31,451
10	120	550	30,765
11	0	450	30,024
12	60	350	30,769
13	60	450	30,102
14	60	450	31,296
15	60	450	31,065

Fonte: Autoria Própria (2024)

Considerando a viabilidade da aplicação desse processo em escala industrial, torna-se essencial um estudo abrangente sobre os custos operacionais, de modo a identificar as condições mais vantajosas economicamente. Como pode ser observado, mesmo o menor resultado obtido de PCS é uma alternativa viável a depender dos custos do processo. Além disso, condições como 450 °C sem tempo de residência (PCS de 30,024 MJ kg⁻¹) e 350 °C com 60 minutos de residência (PCS de 31,451 MJ kg⁻¹ para W- e 30,769 MJ kg⁻¹ para W+) também se destacam como opções que devem ser avaliadas em estudos futuros, considerando a relação entre PCS e custos envolvidos.

Amenaghawon *et al.* (2021) relatam que o *biochar* em média pode atingir um poder calorífico de cerca de 18 MJ kg⁻¹. No presente estudo, mesmo o menor valor obtido no Experimento 5 (27,371 MJ·kg⁻¹) foi aproximadamente 52% superior à média relatada na literatura, ressaltando o elevado potencial energético dos *biochars* produzidos a partir das biomassas avaliadas.

Quando comparamos com as biomassas de origem, como observado na Tabela 7, possuem um elevado PCS, os *biochars* resultantes também apresentaram essa característica. Além disso, ao comparar com outros trabalhos na literatura, apresentados na Tabela 11, observamos que os *biochars* produzidos no presente trabalho demonstraram que de fato, apresentam um PCS superior em comparação com outros tipos de *biochar*.

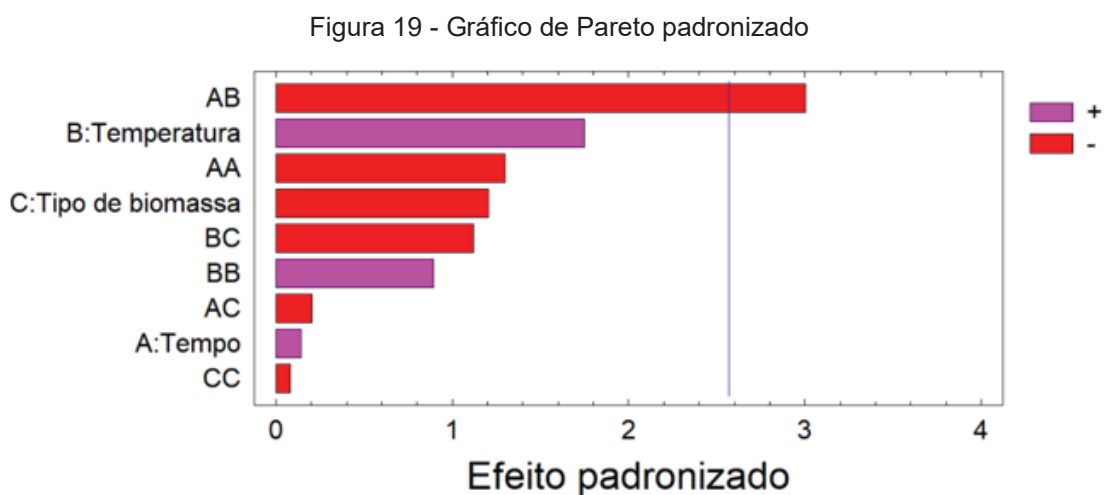
Tabela 11 – Poder calorífico de outros *biochars*

Biochar	Poder calorífico (MJ kg⁻¹)	Referência
Resíduo de chá-mate tostado	26,2	Sozim <i>et al.</i> (2011)
Estróbilos de <i>Pinus elliottii</i>	18,5 a 22,3	Silva (2024)
Lodo de esgoto	11,8	Almeida (2019)
Casca de arroz	10,4	Armynah <i>et al.</i> (2018)
Resíduo da Indústria Sucroalcooleira	8,8	Bernardino <i>et al.</i> (2018)
Resíduos de galhos de árvores frutíferas	27,9, 28,7 e 26,8	Saletnik (2021)
Bagaço de cana-de-açúcar	27,2	Oliveira <i>et al.</i> (2023)
Galho de faia	19,3	Demirbas (2004)
Esterco de cavalo	17,5	Tsai <i>et al.</i> (2015)
Pellets de pinus	31,7	Santos <i>et al.</i> (2016)
Casca de vagem de cacau	25,3	Tsai <i>et al.</i> (2018)

Fonte: Autoria Própria (2024)

A análise estatística dos efeitos das variáveis independentes sobre o poder calorífico do *biochar* foi realizada por meio do gráfico de pareto padronizado, conforme apresentado na Figura 19. Esse gráfico permite identificar a significância estatística

dos efeitos principais e das interações entre as variáveis, auxiliando na determinação dos fatores mais relevantes no processo de pirólise. A análise de variância (ANOVA), que gerou esses resultados, encontra-se completa na seção Apêndice A.



Fonte: Autoria Própria (2024)

No gráfico, cada barra representa o efeito de uma variável independente ou de uma interação entre variáveis sobre a resposta, ou seja, o poder calorífico do *biochar*. A altura das barras indica a magnitude do efeito, enquanto a linha vertical representa o nível de significância estatística adotado, correspondente a um nível de confiança de 95%. Assim, barras que ultrapassam essa linha indicam efeitos estatisticamente significativos, enquanto aquelas que não a ultrapassam sugerem que o impacto da variável pode ser menos relevante ou decorrente do acaso.

Os resultados mostraram que apenas a interação entre o tempo e a temperatura (AB) teve um impacto significativo no poder calorífico do *biochar*, evidenciando sua importância no processo. Por outro lado, as variáveis individuais temperatura (B), tipo de biomassa (C) e tempo (A), assim como as demais interações (AA, BC, BB, AC e CC), não demonstraram influência estatística relevante, indicando que variações nesses parâmetros não alteram substancialmente a resposta. Essa informação é relevante, pois indica que a empresa pode utilizar uma mistura dos três tipos de biomassa sem comprometer o poder calorífico do *biochar*.

Em relação as estimativas dos efeitos das variáveis:

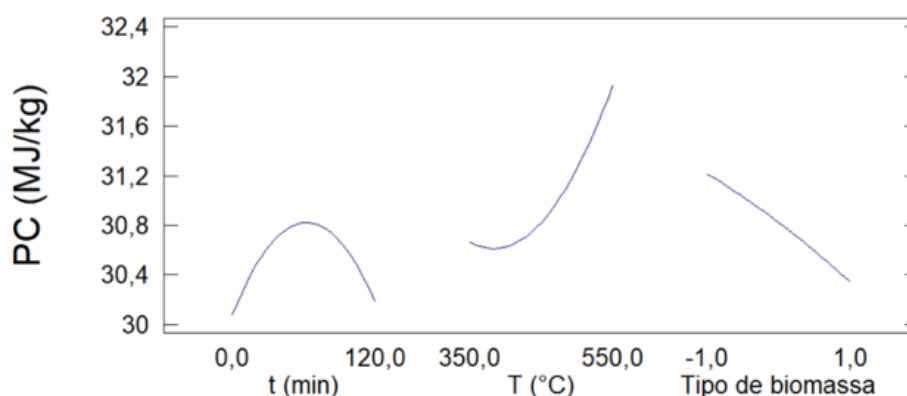
- **A: Tempo:** A mudança no poder calorífico em relação ao tempo é 0,1045. Isso significa que, ao aumentar o tempo, o poder calorífico tende a aumentar um pouco.
- **B: Temperatura:** A temperatura tem um efeito positivo maior, de 1,2645. Isso sugere que, ao aumentar a temperatura, o poder calorífico aumenta mais.
- **C: Tipo de biomassa:** O efeito é -0,871, indicando que alguns tipos de biomassa podem reduzir o poder calorífico.
- Já em relação aos efeitos de interação:
- **AA (interação do tempo com ele mesmo)** – O efeito estimado é -1,38225, sugerindo que o impacto do tempo pode não ser linear e, em alguns casos, tempos maiores podem reduzir o PCS.
- **AB (interação entre tempo e temperatura)** – O efeito estimado em -3,0755 indica que a combinação dessas duas variáveis pode levar a uma redução no poder calorífico. Isso sugere que, em certas condições, o aumento simultâneo de temperatura e tempo pode não ser favorável.
- **AC (interação entre tempo e tipo de biomassa)** – O efeito de -0,2085 sugere que a influência do tempo pode variar conforme o tipo de biomassa utilizada, mas o impacto é relativamente pequeno.
- **BB (interação da temperatura com ela mesma)** – O efeito de 0,95075 indica que há um impacto quadrático positivo da temperatura sobre o PCS, reforçando que temperaturas mais altas tendem a resultar em maior poder calorífico.
- **BC (interação entre temperatura e tipo de biomassa)** – O efeito de -1,1465 sugere que o tipo de biomassa influencia de forma negativa a relação com a temperatura, ou seja, certos tipos de biomassa podem ter uma resposta menos eficiente ao aumento da temperatura.
- **CC (interação do tipo de biomassa com ele mesmo)** – O efeito estimado em -0,08625 indica que o impacto quadrático do tipo de biomassa sobre o PCS é praticamente insignificante.

Ressaltando que, ao considerar um nível de significância de 95%, apenas a interação AB (tempo e temperatura) se mostrou estatisticamente significativa.

Complementarmente, o teste de Durbin-Watson apresentou um valor de 2,08964 ($P=0,3345$), indicando ausência de autocorrelação significativa nos resíduos. Isso sugere que os erros estão distribuídos aleatoriamente, garantindo maior confiabilidade na análise estatística e na predição dos efeitos das variáveis estudadas. Dessa forma, a otimização do processo de pirólise deve considerar a sinergia entre tempo e temperatura, enquanto o tipo de biomassa pode ser flexibilizado sem prejuízo para o poder calorífico do *biochar*.

O gráfico dos principais efeitos para o poder calorífico do *biochar* (Figura 20), evidencia a influência de cada variável independente (tempo de residência, temperatura de pirólise e tipo de biomassa), sobre a resposta analisada.

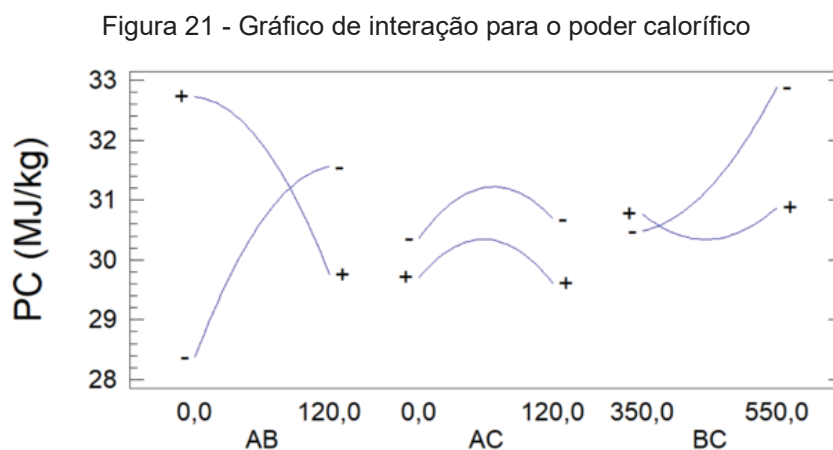
Figura 20 - Gráfico dos principais efeitos para o poder calorífico



Fonte: Autoria Própria (2025)

Observa-se que o poder calorífico tende a aumentar inicialmente com o tempo de residência, seguido por uma leve redução em tempos mais longos. Em relação à temperatura, há um incremento significativo no poder calorífico com o aumento da temperatura de pirólise de 350°C para 550°C, indicando maior eficiência na conversão térmica da biomassa. Já a influência do tipo de biomassa revela diferenças entre os materiais avaliados, com um comportamento que depende das características de cada resíduo utilizado. No gráfico, essa variação sugere que a biomassa influencia o poder calorífico e, de certa forma, isso ocorre, mas não de maneira estatisticamente significativa. Neste sentido, o gráfico dos principais efeitos não contradiz a análise de Pareto, ele apenas apresenta os dados sem considerar se as diferenças são estatisticamente relevantes. A ANOVA, por outro lado, indica que essas diferenças não são grandes o suficiente para serem consideradas influentes no poder calorífico.

É importante destacar que este gráfico apresenta individualmente o comportamento de cada variável nos diferentes tratamentos realizados, sem considerar os efeitos combinados entre elas. Para compreender como as variáveis interagem e influenciam conjuntamente o poder calorífico, é necessário analisar o gráfico de interações (Figura 21).



Fonte: Autoria Própria (2025)

Onde: A é o tempo (min), B é a temperatura (°C) e C representa o tipo de biomassa.

A análise das interações entre os fatores avaliados fornece informações valiosas sobre o comportamento do poder calorífico do *biochar*. No gráfico de interação entre tempo de residência e temperatura (AB), observa-se que as curvas se cruzam, indicando uma interação significativa entre essas variáveis. Esse comportamento sugere que, em temperaturas mais baixas (350°C), um tempo de residência maior pode favorecer o aumento do poder calorífico. No entanto, em temperaturas mais altas (550°C), o tempo prolongado parece ter um efeito contrário, reduzindo o poder calorífico. Isso sugere que, para maximizar o rendimento energético, tempos mais curtos são mais favoráveis em temperaturas elevadas.

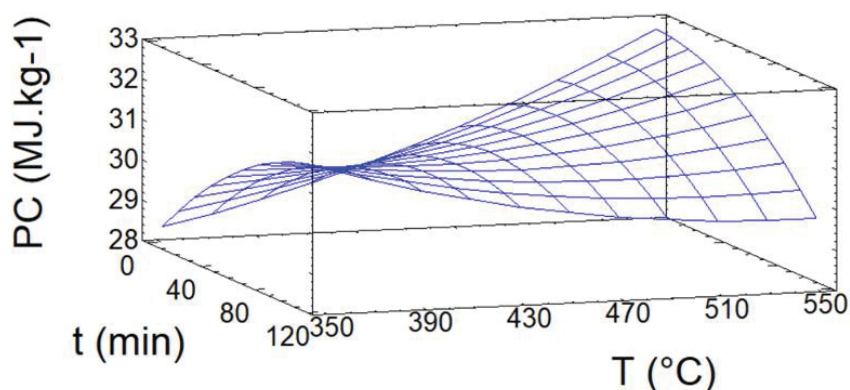
A interação entre temperatura e tipo de biomassa (BC) apresenta variações no comportamento dos materiais, mas sem impacto estatisticamente significativo. Em temperaturas mais baixas, a diferença entre os tipos de biomassa é menos expressiva, enquanto em temperaturas mais elevadas, há um impacto mais evidente, indicando que a temperatura potencializa o efeito das características de cada biomassa no poder calorífico do *biochar*. Especificamente, ao analisar a biomassa

representada por -1 (W+), nota-se que o aumento da temperatura elevou seu poder calorífico. Por outro lado, para a biomassa codificada como +1 (W-), os valores se mantiveram praticamente inalterados, independentemente da temperatura aplicada.

Já a interação entre tempo e tipo de biomassa (AC) apresenta um efeito pequeno, com curvas que não se cruzam de forma significativa, sugerindo uma influência fraca dessa interação sobre o poder calorífico. Esse resultado indica que o impacto do tempo de residência não varia substancialmente entre os diferentes tipos de biomassa analisados. No entanto, observa-se que as biomassas representadas por -1 (W+) apresentaram um maior poder calorífico ao longo do intervalo de tempo analisado, enquanto as biomassas codificadas como +1 (W-) exibiram um poder calorífico inferior, sem variações expressivas em função do tempo de pirólise.

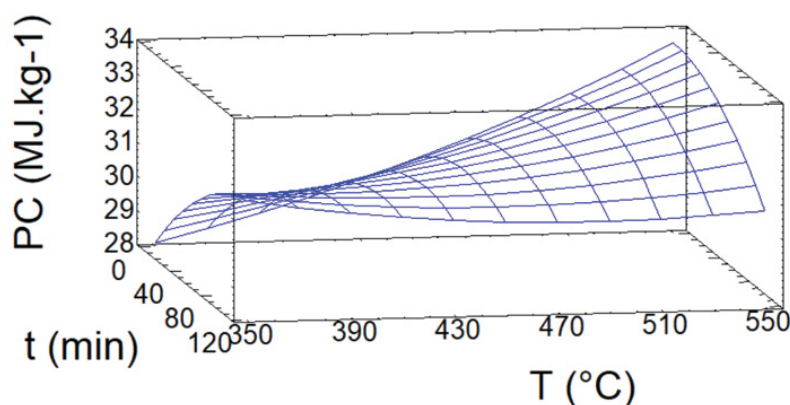
Os gráficos de superfície de resposta (Figura 22, Figura 23 e Figura 24) refletem todos os resultados discutidos anteriormente.

Figura 22 - Gráfico de superfície de resposta do resíduo de chocolate



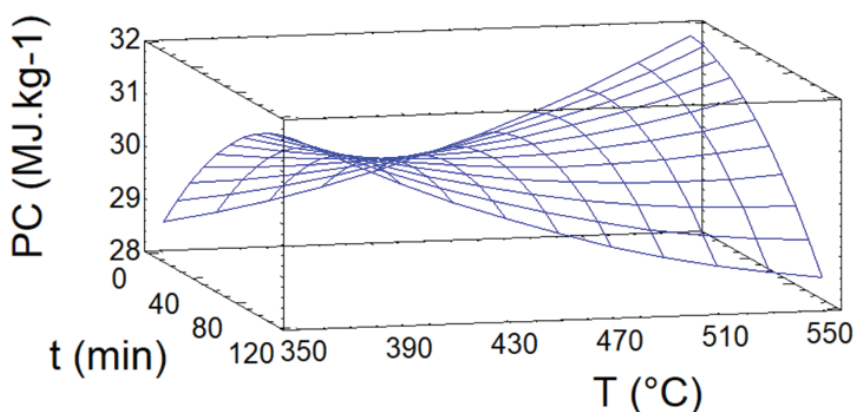
Fonte: Autoria Própria (2025)

Figura 23 - Gráfico de superfície de resposta do resíduo de W+



Fonte: Autoria Própria (2025)

Figura 24 - Gráfico de superfície de resposta do resíduo de W-



Fonte: Autoria Própria (2025)

As variáveis analisadas apresentaram uma pequena variação, conforme ilustrado nessas figuras. Observa-se que o comportamento do chocolate e do W+ foi bastante semelhante, enquanto o W- exibiu um poder calorífico inferior, exceto em condições de baixa temperatura e maior tempo de residência.

Com relação ao ajuste dos dados, a Equação 12 a seguir representa o modelo de regressão ajustado para prever o poder calorífico com base nas variáveis analisadas.

$$\begin{aligned}
 PC = & 29,939 + 0,13924 \times t - 0,0210837 \times T + 2,24837 \times tb & (12) \\
 & - 0,000191979 \times t^2 - 0,000256292 \times t \times T \\
 & - 0,0017375 \times t \times tb + 0,0000475375 \times T^2 \\
 & - 0,0057325 \times T \times tb - 0,043125 \times tb^2
 \end{aligned}$$

Onde: t é o tempo (min), T é a temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e tb é o tipo de biomassa.

O coeficiente de determinação (R^2) do modelo foi de 77,79%, indicando que a maior parte da variabilidade dos dados é explicada pelos fatores analisados. No entanto, a variação restante pode estar associada a fatores como heterogeneidade na composição da biomassa (resíduo), estabilidade do fluxo de nitrogênio, e outros fatores não avaliados que influenciam no poder calorífico. Conforme evidenciado pela ANOVA, o erro total foi de 5,2421, demonstrando que apenas uma pequena parcela da variação não foi explicada.

A tabela de resultados da estimativa do poder calorífico (Tabela 12) ilustra a relação entre os valores observados e os valores ajustados, demonstrando a eficácia do modelo utilizado. Os valores observados, que foram medidos experimentalmente,

são comparados aos valores ajustados, que refletem as previsões do modelo. Além disso, os limites de confiança de 95% para a média, apresentados nas colunas de limite inferior (LI) e superior (LS), fornecem uma indicação da precisão das estimativas.

Tabela 12 – Estimativa do Poder Calorífico: Valores Observados e Ajustados

N	Valor Observado (MJ kg⁻¹)	Valor Ajustado (MJ kg⁻¹)	LI de 95,0% (MJ kg⁻¹)	LS de 95,0% (MJ kg⁻¹)
1	28,872	29,599	27,319	31,878
2	31,598	31,563	29,283	33,842
3	30,358	30,678	28,399	32,958
4	32,688	32,723	30,443	35,002
5	27,370	28,383	26,103	30,662
6	31,093	30,365	28,086	32,645
7	30,591	30,876	28,597	33,156
8	32,202	32,894	30,614	35,173
9	31,451	30,758	28,479	33,038
10	30,765	29,752	27,472	32,031
11	30,024	29,703	27,423	31,982
12	30,769	30,483	28,203	32,762
13	30,102	30,821	29,301	32,340
14	31,296	30,821	29,301	32,340
15	31,065	30,821	29,301	32,340

Fonte: Autoria Própria (2025)

Esses limites de confiança são fundamentais para a interpretação dos resultados, pois estabelecem um intervalo onde se pode ter segurança sobre o valor médio real do poder calorífico. Ao analisar a tabela, observa-se que os ajustes no poder calorífico resultam em valores tanto superiores quanto inferiores em relação aos observados, mantendo-se sempre dentro do intervalo de confiança. Por exemplo, o valor observado de 31,093 foi ajustado para 30,365, refletindo uma diminuição no poder calorífico, mas ainda dentro do limite inferior de 28,086 e superior de 32,645. Em contraste, o valor de 27,370 foi ajustado para 28,383, representando um aumento que permanece dentro do intervalo de confiança, que varia entre 26,103 e 30,662. Esses resultados reforçam a adequação do modelo na análise dos efeitos das variáveis sobre o poder calorífico do *biochar*.

Em relação a otimização (Tabela 13), a análise indicou que a maior eficiência energética foi alcançada com temperatura de 550°C, tempo de residência de 3,14 minutos e um tipo de biomassa próximo ao limite inferior da escala utilizada (W+), resultando em um poder calorífico de 33,5805 MJ kg⁻¹. A temperatura máxima reforçou sua influência positiva, enquanto o tempo ótimo reduzido sugere que períodos prolongados podem não ser vantajosos.

Tabela 13 – Condições ótimas para maximização do poder calorífico do *biochar*

Fator	Mínimo	Máximo	Ótimo
Tempo de residência (min)	0,0	120,0	3,1415
Temperatura de pirólise (°C)	350,0	550,0	550,0
Tipo de biomassa	-1,0	1,0	-0,9975

Fonte: Autoria Própria (2025)

A análise dos resultados demonstra uma relação inversamente proporcional entre o poder calorífico (PC) e o rendimento do *biochar*. Por exemplo, nas condições de 350 °C e 0 minutos, o rendimento atingiu 82%, mas com um PC de 27,371 MJ kg⁻¹, enquanto, a 550 °C e 60 minutos, o PC aumentou para 32,202 MJ kg⁻¹, porém com um rendimento reduzido para 20%.

Esse padrão indica que, embora temperaturas mais elevadas promovam um aumento no poder calorífico, elas também acarretam uma redução significativa no rendimento do combustível. Observa-se que o comportamento das três biomassas foi o mesmo, apresentando tendências semelhantes de variação nas diferentes condições analisadas. Diante dessa relação, torna-se essencial um estudo aprofundado que avalie a relação custo-benefício entre essas variáveis, considerando não apenas a eficiência energética, mas também a viabilidade econômica da produção de *biochar*, visando identificar as condições de processamento que ofereçam o melhor equilíbrio entre essas duas métricas.

4.2.3 Densificação energética e rendimento energético

A densificação energética indica o aumento da concentração de energia no *biochar* em relação à biomassa bruta. Valores superiores a 100% significam que o

biochar possui maior quantidade de energia por unidade de massa em comparação com a biomassa original, tornando-o um combustível mais concentrado.

O rendimento energético, por sua vez, avalia a eficiência do processo de pirólise na retenção da energia da biomassa. Ele combina o rendimento em massa do *biochar* com sua densificação energética, demonstrando a proporção de energia da biomassa que foi efetivamente preservada no *biochar* final.

A Tabela 14 apresenta os valores obtidos para a densificação energética e o rendimento energético em cada experimento. Esses resultados permitem comparar diferentes tipos de biomassa e avaliar quais condições favoreceram uma maior retenção de energia no *biochar*.

Tabela 14 - Densificação energética e rendimento energético dos *biochars* produzidos

Tb	N	Densificação Energética (%)	Rendimento Energético (%)
W-	1	128,68	36,03
Chocolate	2	129,38	67,28
W+	3	134,02	33,50
Chocolate	4	133,84	64,24
Chocolate	5	112,07	91,90
W+	6	137,27	82,36
W-	7	136,34	34,08
W+	8	142,17	28,43
W-	9	140,17	78,50
Chocolate	10	125,97	27,71
W-	11	133,81	77,61
W+	12	135,84	76,07
Chocolate	13	123,25	33,28
Chocolate	14	128,14	32,03
Chocolate	15	127,20	34,34

Fonte: Autoria Própria (2025)

A densificação energética variou entre os experimentos, refletindo o aumento da concentração de energia no *biochar* em comparação com a biomassa bruta. O maior valor foi observado no Experimento 8 (W+), com uma densificação energética de 142,17%, indicando que o *biochar* produzido contém 42,17% mais energia por unidade de massa do que a biomassa original. Outros experimentos que apresentaram alta densificação energética incluem o Experimento 9 (W-), com 140,17%, e o Experimento 6 (W+), com 137,27%. Esses valores demonstram que,

independentemente do rendimento em massa, essas biomassas sofreram uma significativa concentração energética durante a pirólise.

Por outro lado, o maior rendimento energético foi obtido no Experimento 5 (chocolate), alcançando 91,90%, devido ao alto rendimento em massa (82%) combinado com uma densificação energética moderada (112,07%). Outros experimentos com elevado rendimento energético incluem o Experimento 6 (W+), com 82,36%, e o Experimento 9 (W-), com 78,50%. Esses valores indicam que uma maior retenção de massa no *biochar* contribui diretamente para a conservação da energia da biomassa original.

Ao comparar os dois parâmetros, observa-se que, embora o Experimento 8 (W+) tenha apresentado a maior densificação energética, seu rendimento energético foi um dos menores, alcançando apenas 28,43%, devido ao baixo rendimento em massa. Por outro lado, o Experimento 5 (chocolate) teve um bom rendimento energético, mas a densificação energética foi a menor de todas. Em contraste, os Experimentos 6 (W+) e 9 (W-) demonstraram um equilíbrio entre densificação e rendimento energético, resultando em maior eficiência energética. Esses resultados sugerem que estes dois experimentos são de grande relevância no estudo.

4.2.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Com relação à análise de MEV, foram selecionados para avaliação os *biochars* com o maior e o menor poder calorífico, correspondentes aos experimentos 5 e 4, ambos derivados de biomassa de chocolate. Além disso, o experimento 7, produzido a partir de wafer, foi incluído para examinar a estrutura de seus poros e comparar seu comportamento morfológico com os demais.

Através da MEV foi possível obter imagens em alta definição dos *biochars* produzidos, utilizando ampliações de 40x, 120x, 500x, 2kx, 5kx e 20kx. Em alguns casos, não foi necessária a obtenção de imagens em todas as ampliações, pois a análise em determinadas escalas já forneceu informações suficientes sobre a estrutura do material.

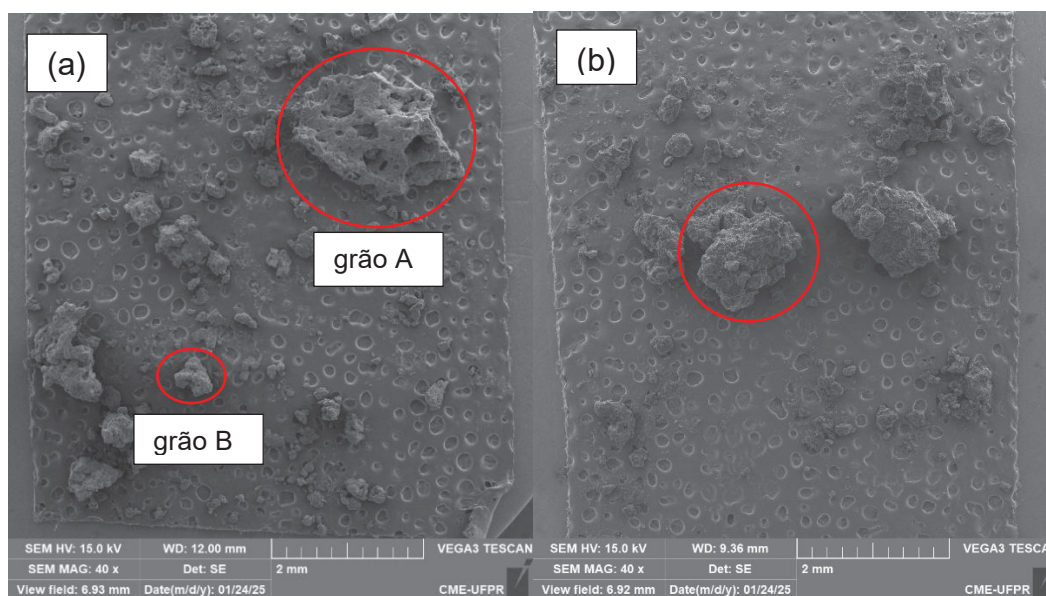
A ampliação de 40x permitiu uma visão geral de todos os *biochars*, possibilitando a comparação entre as amostras e a identificação de diferenças morfológicas. Com base nessa análise inicial, a ampliação de 120x foi utilizada para destacar um grão representativo da amostra, que serviria como referência para as

ampliações subsequentes. As imagens obtidas em 500x, 2kx, 5kx e 20kx foram empregadas para uma visualização mais detalhada da estrutura do *biochar*, permitindo a análise da distribuição dos poros e da influência das condições de pirólise na formação da superfície do material.

Na Figura 25a, observa-se a ampliação de 40x do *biochar* do Experimento 4 (tempo de 0 minutos, temperatura de 550°C, biomassa de chocolate). Nota-se que uma das amostras apresenta morfologia distinta das demais, o que motivou uma ampliação de 120x nesse grão (grão A) para uma análise mais detalhada (Figura 26a). Além disso, uma ampliação de 500x foi realizada (Figura 26b) em um grão representativo (grão B) das demais amostras. Posteriormente, foram realizadas ampliações de 2kx e 5kx (Figura 27) em ambos os grãos, permitindo uma comparação mais detalhada entre suas estruturas dentro do mesmo experimento.

Enquanto isso, na Figura 25b, tem-se a ampliação de 40x do Experimento 5 (temperatura de 350°C, tempo de 0 minutos, também com biomassa de chocolate), demonstrando que todos os grãos apresentam morfologia semelhante.

Figura 25 – Micrografias eletrônicas de varredura com ampliação de 40x para os experimentos 4 (a) e 5 (b)

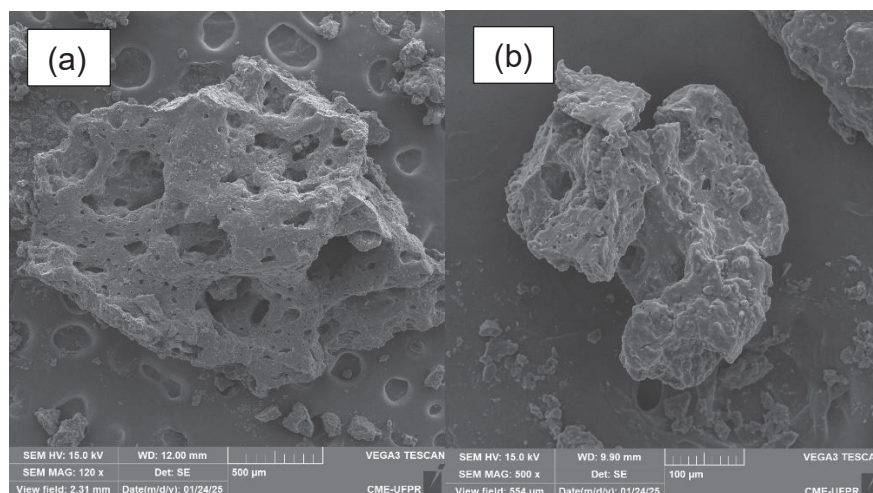


Fonte: Autoria Própria (2025)

Observa-se que os *biochars* do experimento 4 possuem uma estrutura mais porosa, com maior quantidade de cavidades, enquanto a do experimento 5 exibiram superfícies mais compactas e menos irregulares, indicando diferenças na morfologia

resultante do processo de pirólise, por estarem em diferentes condições. Essa variação pode ser atribuída à maior temperatura utilizada no Experimento 4, que favoreceu a formação de cavidades na estrutura do material.

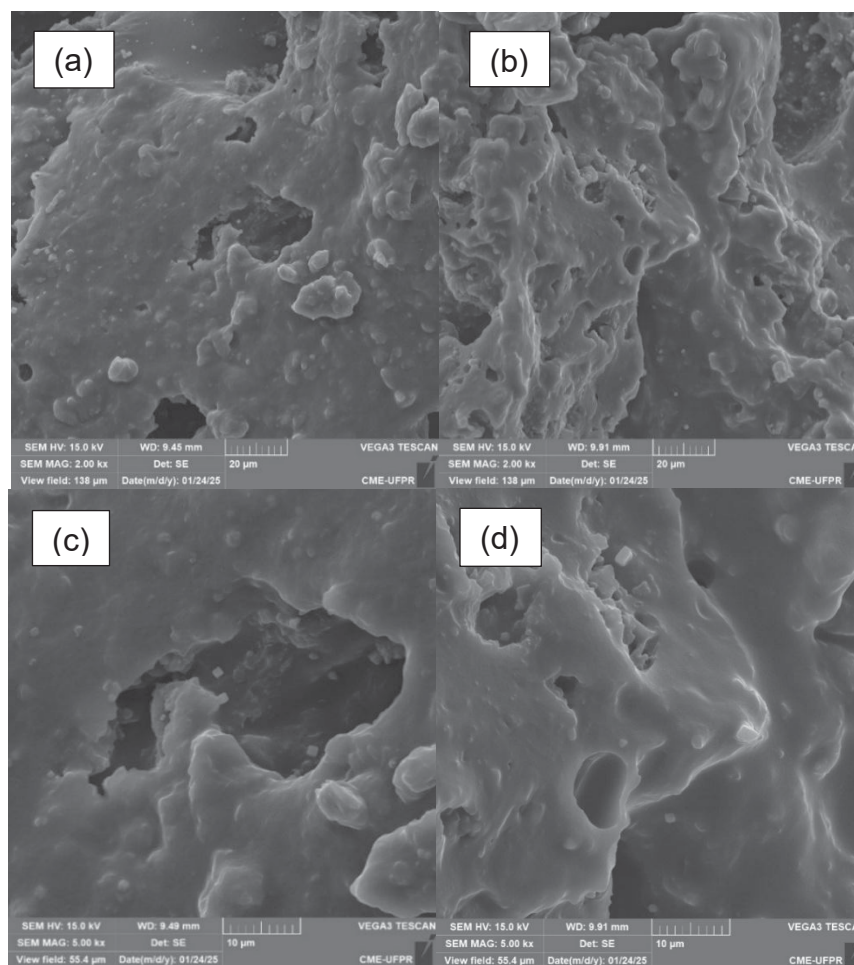
Figura 26 – Micrografias eletrônicas de varredura do Experimento 4: ampliação de 120x para o grão A (a) e 500x para o grão B (b)



Fonte: Autoria Própria (2025)

Ao analisar os grãos, observa-se que, apesar de terem sido produzidos sob as mesmas condições de pirólise, ambos apresentam poros de tamanhos distintos, resultando em uma superfície heterogênea e sem estrutura bem definida. É importante destacar que os poros do grão A são, em sua maioria, maiores do que os do grão B.

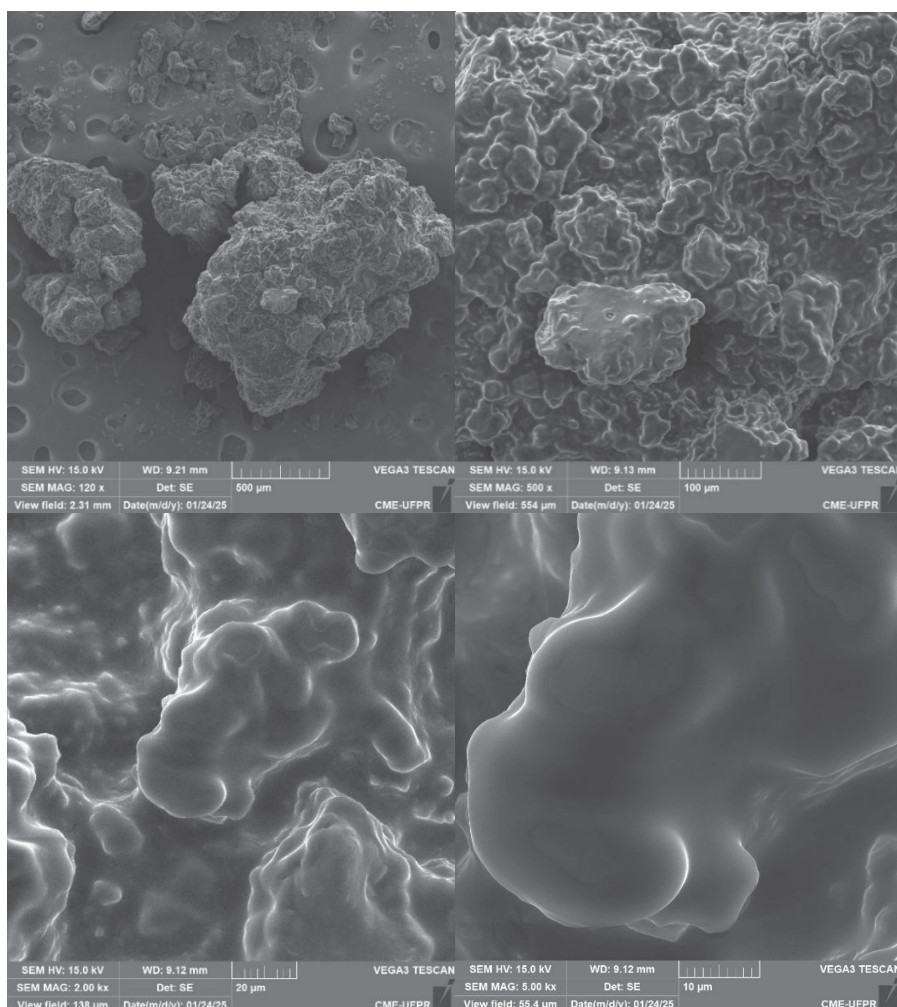
Figura 27 – Micrografias eletrônicas de varredura do Experimento 4: ampliações de 2kx e 5kx para o grão A (a e c) e para o grão B (b e d)



Fonte: Autoria Própria (2025)

A Figura 28 apresenta ampliações das imagens da superfície do material do Experimento 5, onde se observa a ausência de porosidade. De acordo com Materazzi *et al.* (2014) e Du *et al.* (2014), mencionados anteriormente, a degradação da manteiga de cacau ocorre a partir de 300°C. Dessa forma, na temperatura de 350°C utilizada nesse experimento, a gordura permanece parcialmente preservada no *biochar*, influenciando sua morfologia.

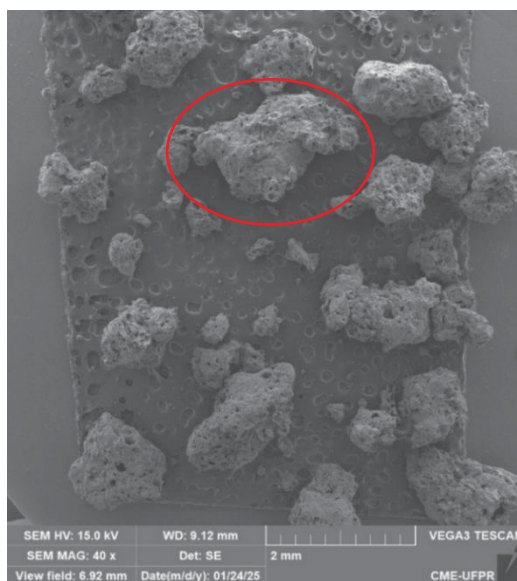
Figura 28 – Micrografias eletrônicas de varredura do Experimento 5: ampliações de 120x, 500x, 2kx e 5kx



Fonte: Autoria Própria (2025)

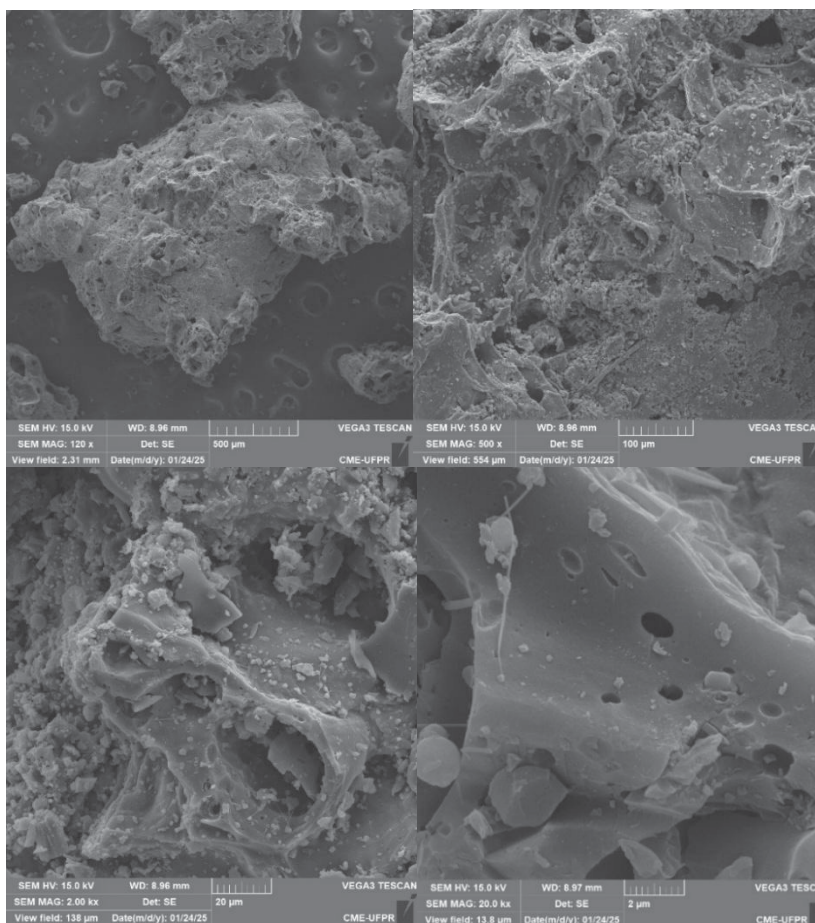
A Figura 29 apresenta a ampliação de 40x do experimento 7 (tempo de 60 min, temperatura de 550°C), seguida pelas imagens com ampliações de 120x, 500x, 2kx e 20kx (Figura 30).

Figura 29 – Micrografias eletrônicas de varredura do experimento 7: ampliação de 40x



Fonte: Autoria Própria (2025)

Figura 30 – Micrografias eletrônicas de varredura do Experimento 7: ampliações de 120x, 500x, 2kx e 5kx



Fonte: Autoria Própria (2025)

Conforme mencionado anteriormente, optou-se por analisar um *biochar* derivado do wafer (Figura 29 e Figura 30), uma vez que os *biochars* avaliados anteriormente foram produzidos a partir do chocolate. A principal diferença observada nesse último *biochar* foi a quantidade e a diversidade de tamanhos dos poros, sendo possível visualizá-los mesmo na ampliação de 20kx, o que sugere um grande potencial para análises de adsorção.

No geral, as imagens de MEV revelaram que a distribuição do tamanho das partículas foi influenciada pelas condições da pirólise, resultando em variações na quantidade e no tamanho dos poros observados nas amostras analisadas. É interessante notar que a maior quantidade de poros no experimento 7 pode ser atribuída à combinação de alta temperatura e um tempo de 60 minutos, em vez de à diferença na biomassa utilizada. Pois, de acordo com Zhang *et al.* (2020), a temperatura de pirólise influencia a eficiência e a ruptura das ligações químicas, fazendo com que as reações ocorram de maneira distinta conforme a temperatura, o que resulta em estruturas diferenciadas nos biocarvões produzidos.

4.2.5 Teor de umidade e cinzas

Para as análises seguintes do estudo, foram selecionados os Experimentos 4, 5, 6 e 9, pois conforme observado, representaram diferentes cenários no processo de produção do *biochar*. O Experimento 4 destacou-se por atingir o maior poder calorífico, configurando-se como referência de maior potencial energético. Em contrapartida, o Experimento 5 foi escolhido por apresentar o menor poder calorífico, constituindo-se como limite inferior de desempenho energético. Já os Experimentos 6 e 9 foram selecionados por evidenciarem um ponto de equilíbrio entre densificação e rendimento energético, condição desejável para aplicações práticas, uma vez que combina estabilidade estrutural e eficiência na conversão energética.

A Tabela 15 apresenta os teores de umidade e cinzas dos *biochars* obtidos nestes experimentos selecionados, evidenciando variações relacionadas à composição da biomassa e às condições de pirólise.

Tabela 15 – Resultado do teor de umidade e cinzas

N	Teor de umidade (%)	Teor de cinzas (%)
4	1,11 ± 0,14	3,07 ± 0,11
5	1,19 ± 0,09	1,95 ± 0,07
6	1,47 ± 0,15	1,89 ± 0,01
9	1,66 ± 0,11	2,90 ± 0,01

Fonte: Autoria Própria (2025)

De acordo com Lehmann e Joseph (2009), o teor de cinzas do *biochar* varia, em termos gerais, entre 0,5% e 5%. Em contrapartida, Miranda (2018) ressalta que, embora as diferentes fontes de biomassa apresentem teores relativamente semelhantes, esses valores podem variar mais amplamente, de 0,1% a 23,6%. Como observação adicional, a autora menciona que o carvão mineral pode apresentar teores de cinzas ainda mais elevados, atingindo até 52,0%. Dessa forma, os resultados obtidos no presente estudo se situam dentro dos padrões esperados para *biochars*, considerando as variações reportadas na literatura.

Além disso, alguns estudos apontam que o aumento da temperatura de pirólise está diretamente associado a maiores teores de cinzas no *biochar*, uma vez que os componentes inorgânicos tendem a se concentrar no material sólido após o processo (Agrafioti *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2014). Esse comportamento também pôde ser verificado nos experimentos realizados com a mesma biomassa, em que o Experimento 4, conduzido a 550 °C, apresentou maior percentual de cinzas em comparação ao Experimento 5, realizado a 350 °C.

Os *biochars* obtidos neste trabalho apresentaram teores de cinzas entre 1,9% e 3,1%, valores consideravelmente inferiores aos relatados na literatura para *biochars* de bagaço de cana. Pires *et al.* (2018) reportaram teores de 8,94% a 200 °C/3h, 15,30% a 300 °C/3h e 17,42% a 400 °C, evidenciando tendência de aumento com a elevação da temperatura. De Souza e Alves (2023), por sua vez, encontraram aproximadamente 8% de cinzas a 350 °C. Essa discrepância pode estar relacionada à composição química inicial da biomassa, às condições de pirólise aplicadas, ao teor de minerais no solo de cultivo ou ainda ao tempo de estocagem do bagaço.

Tal resultado demonstra que o *biochar* produzido a partir da biomassa disponibilizada pela indústria apresenta características mais favoráveis ao uso como

combustível sólido, uma vez que o baixo teor de cinzas implica em menor formação de resíduos inorgânicos durante a combustão, favorecendo a eficiência energética do *biochar*.

Com relação ao teor de umidade do *biochar*, sabemos que é um parâmetro fundamental para sua aplicação como combustível, pois influencia diretamente o poder calorífico e a eficiência do material. Valores mais baixos são desejáveis, uma vez que reduzem as perdas de energia associadas à evaporação da água durante a combustão e melhoram a estabilidade no armazenamento.

Na literatura, o *biochar* produzido a partir de bagaço de cana-de-açúcar apresenta baixos teores de umidade, geralmente variando entre 1,66% e 3,17% (Kather *et al.*, 2024). Esses valores se alinham ao intervalo mais amplo encontrado para *biochars* de resíduos agrícolas, como palha de arroz e serragem, que pode oscilar de 1,11% a 4,18%. De modo semelhante, Weiss *et al.* (2022) observaram umidade de 1,28% em biocarvões obtidos de resíduos industriais, reforçando que valores próximos a 1% são também comuns.

Os resultados obtidos neste estudo demonstram plena consistência com esses referenciais, ainda que todos tenham se mostrado inferiores às faixas reportadas na literatura. O Experimento 6 (1,47%) e o Experimento 9 (1,66%) aproximaram-se do intervalo descrito para *biochar* de cana-de-açúcar, enquanto os Experimentos 4 (1,11%) e 5 (1,19%) apresentaram valores ainda mais baixos, o que reforça a eficiência do processo de pirólise. Essa característica pode ser considerada vantajosa, uma vez que teores de umidade reduzidos implicam menor perda energética durante a combustão.

É importante ressaltar, contudo, que o *biochar* é um material higroscópico e seu teor de umidade pode variar em função das condições de armazenamento. A exposição a ambientes úmidos ou sem proteção adequada pode aumentar significativamente a absorção de água. Apesar dessa sensibilidade, os valores obtidos nesta pesquisa confirmam tanto a qualidade do *biochar* produzido quanto a robustez do processo de pirólise empregado, posicionando os resultados dentro da faixa de referência da literatura científica.

4.2.6 Análise elementar

A análise elementar constitui uma ferramenta fundamental para caracterizar *biochars*, fornecendo informações sobre a composição em carbono, hidrogênio e nitrogênio, determinantes para a eficiência da conversão termoquímica. O carbono é o principal elemento associado ao poder calorífico do *biochar*, de modo que maiores teores refletem em maior PCS. O hidrogênio também contribui para a liberação de energia na combustão, embora em menor escala. Já o nitrogênio, presente em proporções reduzidas, exerce influência sobretudo nas características químicas e na estabilidade do material (Carpenter *et al.*,2014).

No presente estudo, os resultados demonstraram diferenças na composição elementar entre os *biochars* analisados, apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Análise elementar dos *biochars* produzidos

N	Carbono (%)	Hidrogênio (%)	Nitrogênio (%)
4	76,02 ± 0,03	5,82 ± 0,01	1,71 ± 0,00
5	47,04 ± 0,04	6,54 ± 0,05	3,76 ± 0,13
6	70,50 ± 0,01	6,71 ± 0,18	0,77 ± 0,02
9	70,68 ± 0,37	6,67 ± 0,38	1,72 ± 0,38

Fonte: Autoria Própria (2025)

Conforme destacado por Miranda (2018), as fontes de biomassa apresentam teores intermediários de carbono (42,2–58,4 %), enquanto o carvão apresenta valores mais elevados (62,9–86,9 %). Os *biochars* obtidos neste estudo, entretanto, apresentaram teores de carbono acima do esperado para biomassa, aproximando-se dos valores observados em carvão e carvão vegetal.

Entre os *biochars* analisados neste estudo, o Experimento 4 apresentou o maior teor de carbono (76,02%) e hidrogênio relativamente baixo (5,82%), com nitrogênio de 1,71%, refletindo o maior PCS registrado. A alta temperatura favoreceu a volatilização de parte dos compostos nitrogenados, favorecendo a concentração de carbono. Em contraste, o Experimento 5 exibiu menor carbono (47,04%), hidrogênio de 6,54% e nitrogênio mais elevado (3,76%), indicando que a temperatura baixa não foi suficiente para decompor totalmente os compostos nitrogenados, resultando em menor PCS.

Os Experimentos 6 e 9 apresentaram composição intermediária de carbono (70,50% e 70,68%) e hidrogênio (6,71% e 6,67%) respectivamente. Enquanto o nitrogênio variou de 0,77% no W+ a 1,72% no W-, sendo influenciado tanto pelo conteúdo da biomassa quanto pelo tempo e temperatura de pirólise, que afetaram a volatilização dos compostos nitrogenados.

Para o *biochar* obtido a partir do bagaço de cana-de-açúcar, estudos anteriores relatam teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio variando conforme as condições de pirólise e a caracterização da biomassa. Sohaib, Muhammad e Younas (2017) encontraram 66,8% de carbono, 4,62% de hidrogênio e 0,48% de nitrogênio; Osorio e Chejne (2017) reportaram 58,01% de carbono, 3,53% de hidrogênio e 0,95% de nitrogênio; enquanto Doumer *et al.* (2015) observaram 65,03% de carbono, 4,19% de hidrogênio e 0,55% de nitrogênio. Comparados aos resultados deste estudo, os *biochars* de chocolate e wafer apresentaram teores próximos ou superiores, evidenciando seu elevado potencial energético.

A análise geral desses resultados sugere que a concentração de carbono nos *biochars* está relacionada à interação entre temperatura e tempo de residência. Temperaturas elevadas combinadas com tempos menores favorecem maior PCS e, conseqüentemente, maior concentração de carbono. Para temperaturas mais baixas, a retenção de carbono pode ser alcançada mediante aumento do tempo de residência, como observado no Experimento 9. Esses padrões indicam novamente que tanto a temperatura quanto a duração da pirólise desempenham papel fundamental na concentração de carbono e no potencial energético do *biochar*.

4.2.7 Poder Calorífico Inferior (PCI)

O PCI é um parâmetro relevante para avaliar a viabilidade de um combustível sólido, pois corresponde à energia efetivamente disponível para aproveitamento, já descontadas as perdas associadas à condensação da água formada na combustão do hidrogênio e à umidade presente no material. Diferentemente do PCS, que representa o valor máximo de energia liberada, o PCI reflete de forma mais realista o desempenho energético do *biochar* em condições práticas de uso, sobretudo em processos industriais de queima direta.

Nos *biochars* selecionados neste estudo, o PCI apresentou valores que variaram entre 26,97 MJ kg⁻¹ e 32,31 MJ kg⁻¹ (Tabela 17).

Tabela 17 - Valores de PCI para os experimentos selecionados

N	H (%)	U (%)	PCI (MJ kg⁻¹)
4	5,82	1,11	32,31
5	6,54	1,19	26,97
6	6,71	1,47	30,68
9	6,67	1,66	31,04

Fonte: Autoria Própria (2025)

Onde: H é o hidrogênio (%) e U é a umidade (%).

Em todos os casos, observou-se uma redução em relação ao PCS, como esperado: o Experimento 4, por exemplo, passou de 32,69 MJ kg⁻¹ para 32,31 MJ kg⁻¹, representando uma queda de aproximadamente 1,2%. De modo similar, o Experimento 6 reduziu de 31,09 MJ kg⁻¹ para 30,68 MJ kg⁻¹ (1,3%), e o Experimento 9 de 31,45 MJ kg⁻¹ para 31,04 MJ kg⁻¹ (1,3%). O maior decréscimo ocorreu no Experimento 5, que apresentou queda de 27,37 MJ kg⁻¹ para 26,97 MJ kg⁻¹ (1,5%). Essa diferença entre PCS e PCI é explicada, principalmente, pelos teores de hidrogênio e umidade presentes em cada amostra, parâmetros diretamente relacionados à formação de vapor de água durante a combustão. Assim, os resultados confirmam a consistência do cálculo e evidenciam que, embora o PCI seja ligeiramente menor que o PCS, os *biochars* mantêm elevados valores energéticos, reforçando seu potencial como combustível sólido alternativo.

Outros autores também avaliaram o poder calorífico inferior de diferentes biomassas e *biochars*, obtendo valores que servem de referência para comparação. Dos Santos *et al.* (2020), por exemplo, reportaram valores entre 22,35 e 29,39 MJ kg⁻¹ para o *biochar* obtido da borra de café. De forma semelhante, Reis *et al.* (2020) observaram para *biochars* de casca de coco verde valores de 25,6 a 26,0 MJ kg⁻¹. No caso específico do bagaço de cana-de-açúcar, Lima *et al.* (2024) encontraram PCI de apenas 6,84 MJ kg⁻¹ para o material, enquanto Correia *et al.* (2020), ao avaliarem o bagaço, relataram faixas de 14,16 a 19,68 MJ kg⁻¹. As diferenças observadas entre os valores de PCI reportados em diferentes pesquisas podem estar relacionadas a fatores como a umidade do material, as condições de preparo e armazenamento da biomassa, além da metodologia empregada nos ensaios.

Comparando esses resultados com os obtidos no presente estudo (26,97 a 32,31 MJ kg⁻¹), evidencia-se que os *biochars* produzidos não apenas se enquadram

dentro dos intervalos reportados, mas apresentam desempenho energético superior ao de diversas biomassas e *biochars* descritos na literatura, o que reforça sua relevância como alternativa sólida de alto potencial energético.

4.2.8 Custos

A avaliação econômica foi organizada em diferentes sessões para permitir maior clareza na apresentação e discussão dos resultados. Inicialmente, apresentam-se as informações fornecidas pela indústria parceira sobre a geração e destinação de resíduos, incluindo os custos logísticos atualmente envolvidos. Em seguida, é estimado o custo de produção do *biochar* a partir das condições experimentais estudadas, considerando o consumo de energia e os rendimentos obtidos. Posteriormente, são discutidos os resultados em termos de custo por quilograma de *biochar* e, por fim, realiza-se uma comparação direta com o bagaço de cana-de-açúcar, biomassa atualmente considerada pela indústria como alternativa de aquisição.

4.2.8.1 Disponibilidade e Confidencialidade de Dados

Durante a condução do estudo, a empresa parceira optou por preservar alguns dados sensíveis que, embora relevantes para uma análise econômica mais aprofundada, não puderam ser divulgados neste trabalho. Essa decisão decorre do acordo de confidencialidade firmado, de modo que parte das informações está restrita ao âmbito interno da indústria. Ainda assim, a empresa disponibilizou dados suficientes para sustentar a análise de viabilidade, em especial aqueles relacionados à geração e destinação de resíduos e aos custos logísticos associados.

De acordo com as informações fornecidas, a planta industrial gera aproximadamente 12.000 toneladas de resíduos ao ano, correspondendo a uma média mensal de 1.000 toneladas. Deste total, cerca de 20% são constituídos por resíduos de wafer, enquanto os 80% restantes correspondem ao chocolate. Atualmente, a destinação desses resíduos segue três fluxos distintos: a maior parcela é destinada à produção de ração animal, com custo reduzido em função da venda do material; outra fração é enviada ao coprocessamento, cujo custo logístico médio de transporte é de aproximadamente R\$ 1.000 por viagem de 25 toneladas; e uma fração

menor é direcionada a rotas de economia circular, cujo custo logístico é significativamente mais elevado, em torno de R\$ 9.000 por viagem de 20 toneladas.

É importante destacar que os valores apresentados se referem exclusivamente aos custos logísticos de transporte, não contemplando outras etapas de tratamento ou processamento.

Essas informações são fundamentais para compreender o contexto em que o aproveitamento energético das biomassas se insere. Em vez de representar apenas resíduos alimentícios, as biomassas podem ser reconfiguradas como insumo energético de maior valor agregado, o que reforça a relevância da análise apresentada a seguir.

4.2.8.2 Custos de Produção de *Biochar*

Para a avaliação da viabilidade econômica da produção de *biochar* a partir dos resíduos alimentícios, foram aplicadas as equações descritas na seção de Metodologia (Equações 8, 9 e 10), considerando a potência do equipamento (2200 W), a taxa de aquecimento de 10 °C/min e a tarifa de energia elétrica da Companhia Paranaense de Energia para a classe comercial (R\$ 0,48275/kWh).

É importante observar que os cálculos consideraram a mufla operando continuamente em sua potência máxima durante todo o ciclo de pirólise. No entanto, em condições reais, especialmente em temperaturas intermediárias (350–550 °C) e com tempos de residência curtos (60-120 min), o equipamento não atinge nem mantém a potência máxima continuamente. Isso ocorre porque a mufla gasta parte do tempo apenas para aquecer até a temperatura desejada, e seu sistema de controle reduz automaticamente a potência quando a temperatura se aproxima do setpoint. Portanto, os valores de consumo energético e de custo estimados representam uma superestimação conservadora, garantindo que os cálculos forneçam um limite superior seguro para avaliação econômica.

O objetivo desta etapa foi estimar o custo de produção por quilo de *biochar*, permitindo uma comparação direta com a biomassa atualmente adquirida pela indústria (bagaço de cana-de-açúcar) e com os custos de destinação dos próprios resíduos.

4.2.8.3 Consumo de Energia nos Experimentos

O tempo de ciclo e o consumo de energia foram calculados (Equação 8) para os quatro experimentos selecionados do planejamento experimental (Experimentos 4, 5, 6 e 9), contemplando diferentes condições de pirólise e tipos de biomassa. Os valores obtidos encontram-se resumidos na Tabela 18.

Tabela 18 - Tempo de ciclo e consumo de energia

Experimento	Biomassa	Tempo (h)	Consumo (kWh)
4	Chocolate	0,917	2,017
5	Chocolate	0,583	1,283
6	W+	0,750	1,650
9	W-	1,583	3,483

Fonte: Autoria Própria (2025)

Observa-se que as variações no consumo estão diretamente relacionadas à temperatura final de pirólise e ao tempo de residência. Esse fator, entretanto, não é suficiente para avaliar a eficiência econômica do processo, já que a massa de *biochar* obtida em cada ciclo também depende do rendimento e da quantidade de biomassa acondicionada nos cadinhos.

4.2.8.4 Rendimento e Massa de *Biochar* por Ciclo

Para calcular a massa de *biochar* efetivamente produzida em cada ciclo experimental, foi necessário considerar tanto a quantidade de biomassa comportada em cada cadinho quanto o rendimento do processo. No equipamento utilizado, foram empregados quatro cadinhos por ciclo.

No caso da biomassa de W-, cada cadinho comporta 76,50 g de amostra, totalizando 306 g por ciclo. Considerando o rendimento de 56% observado no Experimento 9, a massa de *biochar* resultante foi de 171,36 g. Para o W+, cada cadinho comporta 116,50 g, resultando em 466 g por ciclo; com rendimento de 60% (Experimento 6), foram obtidos 279,6 g de *biochar*.

Já para a biomassa de chocolate, cada cadinho comporta 174,30 g, totalizando 697,2 g por ciclo. No Experimento 4, com rendimento de 48%, a produção foi de

334,66 g de *biochar*, enquanto no Experimento 5, que apresentou rendimento superior de 82%, a produção atingiu 571,7 g por ciclo.

Esses resultados demonstram que, além das condições de pirólise, a própria densidade e compactação das biomassas influenciam o volume de material tratado por ciclo e, conseqüentemente, o custo relativo por quilo de *biochar* produzido.

4.2.8.5 Custo por Quilo de *Biochar*

Com base nos valores de consumo energético e nas massas efetivas de *biochar* obtidas, foi possível estimar o custo de produção por quilograma para cada experimento (Equações 9 e 10).

Biomassa de Chocolate:

Experimento 4 (550 °C, 0 min)

- Custo de energia por ciclo: $2,017 \text{ kWh} \times \text{R\$ } 0,48275. \text{ kWh}^{-1} = \text{R\$ } 0,974$
- Massa de *biochar* produzida por ciclo: $0,335 \text{ kg}$
- Custo por quilo de *biochar*: $\text{R\$ } 0,974 \times 0,335. \text{ kg}^{-1} = \text{R\$ } 2,91. \text{ kg}^{-1}$

Experimento 5 (350 °C, 0 min)

- Custo de energia por ciclo: $1,283 \text{ kWh} \times \text{R\$ } 0,48275. \text{ kWh}^{-1} = \text{R\$ } 0,619$
- Massa de *biochar* produzida por ciclo: $0,572 \text{ kg}$
- Custo por quilo de *biochar*: $\text{R\$ } 0,619 \times 0,572. \text{ kg}^{-1} = \text{R\$ } 1,08. \text{ kg}^{-1}$

Biomassa de W+:

Experimento 6 (450 °C, 0 min)

- Custo de energia por ciclo: $1,650 \text{ kWh} \times \text{R\$ } 0,48275. \text{ kWh}^{-1} = \text{R\$ } 0,797$
- Massa de *biochar* produzida por ciclo: $0,280 \text{ kg}$
- Custo por quilo de *biochar*: $\text{R\$ } 0,797 \times 0,280. \text{ kg}^{-1} = \text{R\$ } 2,85. \text{ kg}^{-1}$

Biomassa de W-:

Experimento 9 (350 °C, 60 min)

- Custo de energia por ciclo: $3,483 \text{ kWh} \times \text{R\$ } 0,48275. \text{ kWh}^{-1} = \text{R\$ } 1,681$
- Massa de *biochar* produzida por ciclo: $0,171 \text{ kg}$
- Custo por quilo de *biochar*: $\text{R\$ } 1,681 \times 0,171. \text{ kg}^{-1} = \text{R\$ } 9,80. \text{ kg}^{-1}$

A Tabela 19 apresenta o resumo dos resultados evidenciados anteriormente.

Tabela 19 - Custo de energia por quilo

Experimento	Biomassa	Custo (R\$.kg ⁻¹)
5	Chocolate	1,08
6	W+	2,85
4	Chocolate	2,91
9	W-	9,80

Fonte: Autoria Própria (2025)

Os resultados evidenciam que o Experimento 5 apresentou o menor custo unitário, R\$ 1,08/kg, resultado da combinação de baixo consumo energético e elevado rendimento. Esse desempenho torna-o mais vantajoso economicamente, mesmo que o poder calorífico superior (PCS) obtido seja inferior ao de outras condições experimentais.

Embora, em uma análise superficial, os valores obtidos (R\$ 1.080.tonelada⁻¹ no caso mais favorável) possam parecer elevados quando comparados ao preço de mercado do bagaço de cana (R\$ 200.tonelada⁻¹), essa comparação direta não é adequada, pois reflete apenas a compra de biomassa externa, enquanto os resíduos alimentícios, quando não aproveitados, geram custos de logística que podem alcançar cerca de R\$ 450.tonelada⁻¹, além dos demais custos que não foram contabilizados.

É importante ainda considerar que os resultados aqui apresentados se referem a uma condição laboratorial, na qual o processo foi conduzido em mufla elétrica, resultando em um custo energético relativamente elevado. Em escala industrial, entretanto, a pirólise pode ser realizada em reatores de maior capacidade, que permitem maior produção por batelada e redução significativa dos custos. Além disso, parte da demanda energética poderia ser suprida por fontes alternativas, como energia solar ou mesmo pela utilização do biogás e do bio-óleo gerados no próprio processo, os quais também possuem potencial de comercialização e agregam valor ao sistema. Outro fator relevante refere-se à logística: a instalação de uma unidade de pirólise próxima à fábrica reduziria não apenas os custos de transporte, mas também as emissões de gases associadas ao uso de caminhões. Dessa forma, a análise desenvolvida neste trabalho deve ser entendida como preliminar e conservadora, indicando que, em condições industriais e com o aproveitamento integral dos coprodutos, a viabilidade econômica tende a ser ainda mais favorável.

4.2.8.6 Comparação de Potencial Energético: Biomassas vs. Bagaço de Cana

Embora o objetivo central deste estudo seja a avaliação do *biochar* obtido por pirólise, optou-se por incluir uma análise comparativa do potencial energético das biomassas frente ao bagaço de cana-de-açúcar. Foi solicitado um levantamento de três orçamentos para a compra do bagaço de cana-de-açúcar no Paraná, obtendo-se uma média de R\$ 200 por tonelada. Esse valor refere-se exclusivamente ao custo de aquisição do material, não contemplando despesas logísticas associadas ao transporte até a planta industrial.

O bagaço apresenta um PCS médio de $17,42 \text{ MJ kg}^{-1}$, o que resulta em aproximadamente 17.420 MJ de energia por tonelada. Em contrapartida, os resíduos de chocolate e wafer analisados neste estudo, que atualmente geram custos de destinação para a empresa, apresentam PCS superiores, implicando na necessidade de menor massa para a geração da mesma quantidade de energia, conforme evidenciado na Tabela 20 que apresenta a comparação direta entre o bagaço de cana e as biomassas do estudo:

Tabela 20 - Massa necessária de biomassa

Biomassa	PCS (MJ kg^{-1})	Massa necessária (kg)
Chocolate	24,423	713,26
W-	22,438	776,38
W+	22,651	769,06
Bagaço de cana	17,420	1000,00

Fonte: Autoria Própria (2025)

Esses resultados demonstram que os resíduos alimentícios exigem cerca de **20–30% menos massa** para fornecer a mesma energia que 1 ton de bagaço de cana. Quando se consideram os custos logísticos de aquisição do bagaço e os custos de destinação dos resíduos, a vantagem do aproveitamento interno torna-se ainda mais evidente.

Essa diferença evidencia uma oportunidade de otimização econômica e ambiental. Ao invés de arcar com os custos de descarte e ainda pagar pela compra de uma biomassa de menor qualidade energética, a indústria poderia utilizar seus

próprios resíduos como combustível. Essa estratégia não apenas eliminaria um custo operacional, mas também garantiria uma fonte de energia mais eficiente, contribuindo para a sustentabilidade da cadeia produtiva e a circularidade dos recursos.

Em relação a uma análise de custos mais aprofundada, não foram encontrados dados públicos ou de literatura que pudessem avaliar o custo de produção do *biochar* de bagaço de cana-de-açúcar. Tal limitação impede uma comparação econômica direta entre o *biochar* produzido neste estudo e o *biochar* de bagaço de cana. Contudo, essa limitação não compromete a viabilidade da pesquisa, pois o foco central do estudo reside na comparação entre o *biochar* de resíduos e a biomassa de bagaço de cana, que é o material que a indústria parceira considera comprar. E a viabilidade econômica do processo de pirólise dos resíduos de chocolate e wafer é evidenciada pela superioridade do poder calorífico do *biochar* em relação à biomassa de bagaço e, mais importante, pela eliminação dos custos de destinação dos resíduos, transformando-os em um ativo energético de valor agregado.

Adicionalmente, é importante notar que a presente análise se concentrou nas questões econômicas e energéticas, deixando de aprofundar outros importantes benefícios do processo de pirólise. Embora não tenham sido quantificados, aspectos ambientais como o potencial de sequestro de carbono e a redução de emissões de gases de efeito estufa são fundamentais e reforçam a importância do *biochar* como uma solução sustentável.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÃO

Os resultados do trabalho sugerem a viabilidade técnica das biomassas de chocolate e wafer como potenciais combustíveis em diversos processos. Os teores de umidade e cinzas das amostras analisadas estão dentro dos limites recomendados, indicando adequação para a conversão em *biochar*. A análise termogravimétrica (TG e DTG) revelou que o chocolate se decompõe em duas fases distintas, enquanto os wafers apresentam três ou quatro etapas de decomposição, dependendo do teor de recheio. Essas etapas estão relacionadas à decomposição de compostos específicos, como açúcares, compostos aromáticos de sabor e manteiga de cacau. A partir dessa análise, foi possível determinar as temperaturas ideais para a produção dos *biochars*, sendo 350 °C, 450 °C e 550 °C.

Os rendimentos em massa variaram de 20% a 82%, dependendo das condições de pirólise, confirmando que, quanto maior a temperatura, menor o rendimento. O modelo Box-Behnken para o poder calorífico superior (PCS) apresentou um R^2 de 77,79%, com a menor média de 27,371 MJ kg⁻¹ para a biomassa de chocolate processada a 350 °C e a maior média de 32,688 MJ kg⁻¹ para a mesma biomassa a 550 °C. Com o rendimento energético observou-se um ganho de até 42,17% em relação à biomassa, com o maior rendimento energético alcançado de 91,90%. Vale ressaltar que, devido à natureza residual das biomassas utilizadas, as análises podem não ter apresentado as características esperadas.

As imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostraram que a distribuição do tamanho das partículas foi influenciada pelas condições de pirólise, resultando em variações na quantidade e no tamanho dos poros nas amostras analisadas. Observou-se que o *biochar* do experimento 7 apresentou a maior quantidade de poros, enquanto o do experimento 5 a menor.

Além disso, a análise de umidade e cinzas do *biochar* demonstrou valores entre 1,11% e 1,66% de umidade e 1,89% a 3,07% de cinzas, reforçando a qualidade do produto produzido e sua adequação para aplicações energéticas. A análise elementar evidenciou teores de carbono de 47,04% a 76,02%, hidrogênio de 5,82% a 6,71% e nitrogênio de 0,77% a 3,76%, com destaque para o maior teor de carbono observado no experimento a 550 °C.

Em termos energéticos, o poder calorífico inferior (PCI) variou de 26,97 MJ kg⁻¹ a 32,31 MJ kg⁻¹, valores que superam amplamente os de diversas biomassas

agrícolas e industriais reportadas na literatura. Do ponto de vista econômico, o custo de produção do *biochar* oscilou entre R\$ 1,08.kg⁻¹ e R\$ 9,80.kg⁻¹, sendo o experimento 5 (chocolate a 350 °C) o mais favorável em termos de rendimento e eficiência energética.

De modo geral, quando comparados a biomassas tradicionalmente utilizadas e seus combustíveis sólidos, os *biochars* de chocolate e wafer apresentaram desempenho superior em diversos aspectos, consolidando-se como materiais de elevada qualidade energética. Destaca-se especialmente o PCI, posicionando-os como combustíveis sólidos de alta densidade energética.

Essas evidências reforçam o potencial das biomassas de chocolate e wafer não apenas como fontes de energia, mas também como solução estratégica para a gestão de resíduos da indústria alimentícia, contribuindo para a redução dos impactos ambientais.

REFERÊNCIAS

ABICAB. Associação Brasileira Da Industria De Chocolates, Cacau, Amendoim, Balas E Derivados. **Dia do Chocolate: produção de chocolates aponta crescimento de 9,8% no 1º trimestre de 2023**. Disponível em: <http://www.abicab.org.br>. Acesso em: 05 fev. 2024.

ABIMAPI. Associação Brasileira das Indústrias de Biscoitos (Abimapi) **R\$ 70 bilhões! Setor de biscoitos e massas registra recorde em 2023** <https://abimapi.com.br/setor/r-70-bilhoes-setor-de-biscoitos-e-massas-registra-recorde-em-2023/> Acesso em: 05 abr. 2024.

AGÊNCIA BRASIL. **Brasil exporta 31 mil toneladas de biscoitos no 1º semestre de 2024**. Agência Brasil, 20 jul. 2024. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2024-07/brasil-exporta-31-mil-toneladas-de-biscoitos-no-1o-semester-de-2024>. Acesso em: 10 mar. 2024.

AGÊNCIA BRASIL. **Mercado de chocolate é promissor em produção, exportação e empregos**. Agência Brasil, 07 jul. 2023. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2023-07/mercado-de-chocolate-e-promissor-em-producao-exportacao-e-empregos>. Acesso em: 10 mar. 2024

AGRAFIOTI, Evita *et al.* *Biochar production by sewage sludge pyrolysis*. **Journal of analytical and applied pyrolysis**, v. 101, p. 72-78, 2013.

ALMEIDA, Willian Mateus de Sousa. **Estudo do balanço energético do processo de pirólise de lodo de esgoto em escala laboratorial**. 2019. 86 f. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) – Universidade Federal do Tocantins, Programa de Pós-Graduação em Agroenergia, Palmas, 2019.

ALVES, J. L. F. et al. **Exploring Açaí Seed (*Euterpe oleracea*) Pyrolysis Using Multi-component Kinetics and Thermodynamics** Assessment Towards Its Bioenergy Potential. *Bioenerg. Res.* 2020.

AMENAGHAWON, Andrew N. et al. Biomass pyrolysis technologies for value-added products: a state-of-the-art review. **Environment, development and sustainability**, p. 1-55, 2021.

AMIN, Tawheed et al. In vitro digestion, physicochemical and morphological properties of low glycemic index rice flour prepared through enzymatic hydrolysis. **International Journal of Food Properties**, v. 21, n. 1, p. 2632-2645, 2018.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Aneel reforça protagonismo do Brasil em fontes renováveis no Energyyear 2022**. 2022. Disponível em: [https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/aneel-reforca-protagonismo-do-brasil-em-fontes-renovaveis-no-energyyear-2022/656877?inheritRedirect=false&redirect=https%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%](https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/aneel-reforca-protagonismo-do-brasil-em-fontes-renovaveis-no-energyyear-2022/656877?inheritRedirect=false&redirect=https%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2F)

2Fsala-de-imprensa-exibicao-2%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_zXQREz8EVIZ6%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn-2%26p_p_col_pos%3D1%26p_p_col_count%3D3. Acesso em: 08 abr. 2024.

ANEEL-Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas da Energia Elétrica do Brasil**, 3a ed. Brasília, 2008

ANSARI, Khursheed B. et al. Effect of temperature and transport on the yield and composition of pyrolysis-derived bio-oil from glucose. **Energy & fuels**, v. 32, n. 5, p. 6008-6021, 2018.

ARMYNAH, Bidayatul et al. Análise das propriedades químicas e físicas do *biochar* a partir da biomassa da casca de arroz. In: **Jornal de Física: Série de Conferências**. Publicação IOP, 2018. pág. 012038.

ASTM. **E2550-11: Standard Test Method for Thermal Stability by Thermogravimetry**. West Conshohocken, 2011

ASTM. E1755 - **Test Method for Ash in Biomass**, 2024. Disponível em: E1755 Método de Teste Padrão para Cinzas em Biomassa (astm.org) Acesso em: 04 abr. 2024.

ASTM Standard D1762 – 84. **Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal**. Philadelphia, USA: American Society for Testing and Materials, 2013.

BARBOSA, Grasielle Oliveira et al. Análise bromatológica e de rotulagem de chocolate ao leite e chocolate 70%. **JAPHAC–Journal of Applied Pharmaceutical Sciences**, v. 7, p. 42-52, 2020.

BASU, Prabir. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory. 2ª. ed. Burlington: **Academic Press**, (2013). p. 551.

BAZARGAN, Alireza; ROUGH, Sarah L.; MCKAY, Gordon. Compaction of palm kernel shell *biochars* for application as solid fuel. **Biomass and Bioenergy**, v. 70, p. 489-497, 2014.

BERNARDINO, C. A. R. et al. Torta de filtro, resíduo da indústria sucroalcooleira-uma avaliação por pirólise lenta. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 3, p. 551-573, 2018.

BOTTAN, Tatiane. Avaliação dos teores de ácidos graxos em alimentos comercializados na cidade de São Paulo. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

BOX, George EP; BEHNKEN, Donald W. Some new three level designs for the study of quantitative variables. **Technometrics**, v. 2, n. 4, p. 455-475, 1960.

BP. **Statistical Review of World Energy 2021**. Londres: BP p.l.c., 2021. Disponível em: <https://www.bp.com/content/dam/bp/businesssites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-primary-energy.pdf>. Acesso em: jan. 2025.

BRASIL. Estado de São Paulo. **Decreto n.º 12.486, de 20 de outubro de 1978**. Aprova Normas Técnicas Especiais relativas a Alimentos e Bebidas. São Paulo: Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo, 20 out. 1978. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/1978/decreto%20n.12.486.%20de%2020.10.1978.pdf>. Acesso em: jan. 2025.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Ministério da Saúde**. Disponível em: <https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2005>. Acesso em 10 out 2023.

BRIDGEWATER, Anthony V. Biomass fast pyrolysis. **Thermal science**, v. 8, n. 2, p. 21-50, 2004.

BRIDGEWATER, Tony. Desafios e oportunidades na pirólise rápida de biomassa: Parte I. **Johnson Matthey Technology Review**, v. 62, n. 1, p. 118-130, 2018.

BRIDGEWATER, Tony. Towards the 'bio-refinery': fast pyrolysis of biomass. **Renewable energy world**, v. 4, 2001.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (CCEE). **Crescimento de energia renovável brasileira equivale a mais de 3 usinas de Itaipu**. 2023. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/pt/web/guest/-/crescimento-de-energia-renovavel-brasileira-equivale-a-mais-de-3-usinas-de-itaipu>. Acesso em: 6 mar. 2025.

CAMPION, Luca *et al.* The costs and benefits of *biochar* production and use: A systematic review. **Journal of Cleaner Production**, v. 408, p. 137138, 2023.

CARPENTER, D. *et al.* Biomass feedstocks for renewable fuel production: a review of the impacts of feedstock and pretreatment on the yield and product distribution of fast pyrolysis bio-oils and vapors. **Green Chem.**, v. 16, n. 2, p. 384–406, 2014.

CARVALHO, Roseanne Santos de *et al.* Utilização do biocarvão de bagaço de laranja na remoção de tetraciclina em água residuária. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, p. e12980, 2021.

CHEN, Dezhen *et al.* Tecnologias de pirólise para resíduos sólidos urbanos: uma revisão. **Gestão de resíduos**, v. 34, n. 12, p. 2466-2486, 2014.

COCHRANE, Thomas T.; SANCHEZ, Pedro A. Land resources, soils and their management in the Amazon region: a state of knowledge report. **Amazonia: Agriculture and land use research**, p. 137-209, 1982.

CONZ, Rafaela Feola. Caracterização de matérias-primas e biochars para aplicação na agricultura. 2015. **Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas)** – Escola

Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

CORREIA, Mateus Azevedo Chaves *et al.* Características e potencial energético do bagaço da cana-de-açúcar armazenado sem cobertura por um período prolongado. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 13, n. 1, p. 173–187, 2020.

DA SILVA, Marcelo Bacci; DOS SANTOS MORAIS, Anderson. Avaliação energética do bagaço de cana em diferentes níveis de umidade e graus de compactação. **XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Rio de Janeiro**, 2008.

DEMIRBAS, Ayhan. Determination of calorific values of bio-chars and pyro-oils from pyrolysis of beech trunkbarks. **Journal of analytical and applied pyrolysis**, v. 72, n. 2, p. 215-219, 2004.

DE PAULA PROTÁSIO, Thiago *et al.* Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 66, p. 113-113, 2011.

DE SOUZA, Janardelly Gomes; ALVES, Marcelo Rodrigo. Caracterização química de biocarvões produzidos a partir de biossólido e bagaço de cana-de-açúcar. In: **Colloquium Exactarum. ISSN: 2178-8332**. 2023. p. 154-163.

DOAT, J. Le pouvoir calorifique des bois. **Revue Bois et Forêts des Tropiques**, n. 172, p. 33-55, 1977

DOS SANTOS, Débora Federici *et al.* Otimização da produção de *biochar* a partir de casca de tinguí. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 2, p. 9602-9615, 2022.

DOS SANTOS, Shirlene Tamires Oliveira *et al.* Potencial energético do biocarvão de pirólise a partir da borra de café. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 48662-48670, 2020.

DOUMER, M. E. *et al.* Slow pyrolysis of different Brazilian waste biomasses as sources of soil conditioners and energy, and for environmental protection. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 113, p. 434–443, 2015.

DU, Yuying *et al.* TG-pyrolysis and FTIR analysis of chocolate and biomass waste. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 117, p. 343-353, 2014.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). **Balanco Energético Nacional 2023: Ano base 2022 / Empresa de Pesquisa Energética**. – Rio de Janeiro: EPE, 2023

FARIAS, Bruno Maués *et al.* Investigação cinética da pirólise de biomassa amazônica por termogravimetria. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 49400-49418, 2020.

FEHLAUER, Tarcisio Kurt. Potencial de dois diferentes resíduos da indústria madeireira para uso energético. **ANAIS DO ENIC**, n. 5, 2013.

FELIZ, Rodrigo. **Quantificação da Redução do consumo de água e de perdas na produção de wafer com adição de uma preparação enzimática**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

FERREIRA, SL Costa et al. Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods. **Analytica chimica acta**, v. 597, n. 2, p. 179-186, 2007.
GALVÃO, Ícaro Monteiro. **Caracterização de propriedades físico-hídricas de solo condicionado com *biochar* de cana-de-açúcar**. 2023. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

GIRÃO, Luiz Eduardo Barbosa. **Bagaço de cana-de-açúcar: investigação do poder calorífico e potencial energético**. 2016.

GÓMEZ, Edgardo. **Estudo da pirólise rápida de capim elefante em leito fluidizado borbulhante mediante caracterização dos finos de carvão**. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, São Paulo, 2002.

Guardabassi PM. **Sustentabilidade da biomassa como fonte de energia: perspectivas para países em desenvolvimento**. [dissertação] São Paulo: Universidade de São Paulo, 2006.

GUNSTONE, Frank (Ed.). **Vegetable oils in food technology: composition, properties and uses**. John Wiley & Sons, 2011.

G1. Produção nacional de ovos de Páscoa cresce 17% em 2024, segundo a associação do setor. **Jornal Nacional**, 29 mar. 2024. Disponível em: <https://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2024/03/29/producao-nacional-de-ovos-de-pascoa-cresce-17percent-em-2024-segundo-a-associacao-do-setor.ghtml>. Acesso em: 13 mar. 2025.

HASSAN, Masud et al. Influences of feedstock sources and pyrolysis temperature on the properties of *biochar* and functionality as adsorbents: A meta-analysis. **Science of the Total Environment**, v. 744, p. 140714, 2020.

HERME, Pierre. **Larousse do Chocolate**. Editora Larousse. 1ª edição - São Paulo – 2006.

HUANG, Chao-Wei et al. Cofiring characteristics of coal blended with torrefied Miscanthus *biochar* optimized with three Taguchi indexes. **Energy**, v. 172, p. 566-579, 2019.

HUANG, B.-C. et al. Envisaging wastewater-to-energy practices for sustainable urban water pollution control: Current achievements and future prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 134, 2020.

IEA - International Energy Agency. **Perspectivas da tecnologia energética 2014**. 2014. Disponível em: <http://www.iea.org/etp/etp2014/>. Acesso em: 16 jul. 2024.

IEA - International Energy Agency. **World Energy Outlook 2024**. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/140a0470-5b90-4922-a0e9-838b3ac6918c/WorldEnergyOutlook2024.pdf>. Acesso em: jan. 2025.

JIN, Jun et al. StOSt-rich fats in the manufacture of heat-stable chocolates and their potential impacts on fat bloom behaviors. **Trends in Food Science & Technology**, v. 118, p. 418-430, 2021.

JOEL, Ndife et al. Production and quality evaluation of cocoa products (plain cocoa powder and chocolate). **American journal of food and nutrition**, v. 3, n. 1, p. 31-38, 2013

JUSBRASIL, 2017 **Comissão aprova percentual mínimo de 27% de cacau em chocolates e derivados**. Disponível em: <https://www.jusbrasil.com.br/noticias/comissao-aprova-percentual-minimo-de-27-de-cacau-em-chocolates-e-derivados/476038993> Acesso em 10 dez 2023.

KARACA AÇARI, İdil. Determinação da estrutura química de biscoitos dietéticos com técnicas estruturais modernas. **Jornal Científico Cumhuriyet**, 2021.

KHATER, El-Sayed *et al.* *Biochar* production under different pyrolysis temperatures with different types of agricultural wastes. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 2625, 2024.

KISIKI NSAMBA, Hussein et al. **Sustainable technologies for small-scale biochar production a review**. 2015.

KWAK, Jae-Seob. Application of Taguchi and response surface methodologies for geometric error in surface grinding process. **International journal of machine tools and manufacture**, v. 45, n. 3, p. 327-334, 2005.m

LEHMANN, Johannes et al. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems—a review. **Mitigation and adaptation strategies for global change**, v. 11, p. 403-427, 2006.

Lehmann, Johannes; Joseph, Stephen; **Biochar for Environmental Management: Science and Technology**, 2nd. ed., London & Sterling: London, 2009.

LIPP, Markus; ANKLAM, Elke. Review of cocoa butter and alternative fats for use in chocolate—part A. Compositional data. **Food chemistry**, v. 62, n. 1, p. 73-97, 1998.

LI, Simeng; CHEN, Gang. Thermogravimetric, thermochemical, and infrared spectral characterization of feedstocks and *biochar* derived at different pyrolysis temperatures. **Waste Management**, v. 78, p. 198-207, 2018.

LIMA, V. H. de *et al.* Predição do Poder Calorífico Inferior do Bagaço de Cana-de-Açúcar a partir de sua composição elementar. **Energy and Power Engineering**, v. 16, p. 252–265, 2024.

LIU, Zhengang et al. **Production of solid *biochar* fuel from waste biomass by hydrothermal carbonization**. *Fuel*, v. 103, p. 943-949, 2013.

LIU, Kuan-Ju; CHANG, Hung-Min; LIU, Kuan-Miao. Enzymatic synthesis of cocoa butter analog through interesterification of lard and tristearin in supercritical carbon dioxide by lipase. **Food chemistry**, v. 100, n. 4, p. 1303-1311, 2007.

LIZCANO, Jonathan Vasquez. **Poder calorífico, energia e cinzas da biomassa de cana-de-açúcar irrigada por gotejamento, para diferentes variedades, lâminas e processos de maturação**. 2015. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

LORA, Electo Eduardo Silva et al. Gaseificação e pirólise para a conversão da biomassa em eletricidade e biocombustíveis. **Biocombustíveis. Interciência**, v. 1, p. 411-498, 2012.

MAIA, Claudia Maria Branco de Freitas. Produção de biocarvão a partir de diferentes fontes de biomassa. **Aracajú, Sergipe, Brazil:[sn]**, p. 4, 2011.

MANLEY, D. Wafer biscuits. In: **Manley's technology of biscuits, crackers and cookies**. Woodhead Publishing, 2011. p. 353-371.

MARQUES, C. A. et al. Produção de biochar com palha de cana-de-açúcar (*Saccharum* sp.). **Research, Society and Development**, v. 11, n. 1, e31211124675, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i1.24675.

MATERAZZI, Stefano et al. Caracterização termogravimétrica do chocolate amargo. **Jornal de Análise Térmica e Calorimetria**, v. 116, p. 93-98, 2014.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource Technology**, v. 83, p. 37-46, 2002.

MONTILLA, Tamires Carvalho Lins. **Avaliação da presença de ácidos graxos trans e ácidos graxos saturados em bolachas recheadas e bolachas wafers produzidas no Brasil**. 2023. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MIRANDA, Nahieh Toscano. **Investigação das condições operacionais para produção de bio-óleo e *biochar* a partir de bagaço de cana-de-açúcar por meio de simulação e aplicação em planta piloto**. 2018. Tese de Doutorado.

NAIK, Bindu; KUMAR, Vijay. Cocoa butter and its alternatives: A review. **Journal of Bioresource Engineering and Technology**, v. 1, p. 7-17, 2014.

NEMATIAN, Maryam; KESKE, Catherine; NG'OMBE, John N. A techno-economic analysis of *biochar* production and the bioeconomy for orchard biomass. **Waste Management**, v. 135, p. 467-477, 2021.

NÓBREGA, Ísis Patrícia Cardoso. **Efeitos do *biochar* nas propriedades físicas e químicas do solo: Sequestro de carbono no solo**. 2011. Dissertação de Mestrado. Universidade Técnica de Lisboa (Portugal).

NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta et al. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

OLIVEIRA, Débora Camilo de; MURTA, Livia Oliveira; TEIXEIRA, Alan Rodrigues. **Produção e caracterização do biocarvão para produção de energia**. In: II SIMPÓSIO DE PESQUISA DO ECOSSISTEMA ÂNIMA, 2., 2023, Online. Disponível em: https://simposiodepesquisa.animaeducacao.com.br/doc_pro/resumo_expandido_653c4772ac099.pdf. Acesso em: 01 jan. 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Nova York: ONU, 2015. Disponível em: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/pt/>. Acesso em: 02 dez. 2025.

OSORIO, J.; CHEJNE, F. Bio-Oil Production in Fluidized Bed Reactor at Pilot Plant from Sugarcane Bagasse by Catalytic Fast Pyrolysis. **Waste and Biomass Valorization**, p. 1–9, 2017.

OSTROWSKA-LIGEŻA, Ewa et al. Thermogravimetric characterization of dark and milk chocolates at different processing stages. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 134, p. 623-631, 2018.

PEDROZA, Marcelo Mendes M et al. Produção e tratamento de lodo de esgoto – uma revisão. **Revista Liberato**, v. 11, p. 147 - 157, jul./dez.2010

PEDROZA, Marcelo Mendes et al. Characterization of the products from the pyrolysis of sewage sludge in 1 kg/h rotating cylinder reactor. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 105, p. 108-115, 2014.

PINTO, Ana Luisa Daibert et al. Determinação e verificação de como a gordura trans é notificada nos rótulos de alimentos, em especial naqueles expressos “0% gordura trans”. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 19, 2016.

PIRES, I. C. S. A. et al. *Biochar* de palha de cana-de-açúcar: caracterização e estudo do processo. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 4, p. 892-899, 2018.

PULKA, Jakub et al. Is the *biochar* produced from sewage sludge a good quality solid fuel? **Archives of Environmental Protection**, v. 42, n. 4, 2016.

REIS, Edclea do Nascimento *et al.* **Biocarvão e bio-óleo de cascas de coco (Cocos nucifera L.) sob diferentes temperaturas de pirólise**. 2020.

Resolução **RDC nº 264**, de 22 de setembro de 2005. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2005/rdc0264_22_09_2005.html. Acesso em: 13 mar. 2025.

REVISTA PADARIA MODERNA. **Umidade alta causa prejuízos em indústria de chocolate**. 2021. Disponível em:

<https://padariamoderna.com.br/revistapadariamoderna/index.php/umidade-alta-causa-prejuizos-em-industria-de-chocolate/>. Acesso em: jan. 2025.

RIPOLI, T. C. *et al.* Potencial energético de resíduos de colheita de cana verde. **STAB- Açúcar, Álcool e Subproductos**, Piracicaba, v.10, n. 1, p. 23-26, 1991.

SAHOO, Kamalakanta *et al.* Life-cycle assessment and techno-economic analysis of *biochar* produced from forest residues using portable systems. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 26, n. 1, p. 189-213, 2021.

SALETNIK, Bogdan *et al.* Effect of the pyrolysis process applied to waste branches biomass from fruit trees on the calorific value of the *biochar* and dust explosivity. **Energies**, v. 14, n. 16, p. 4898, 2021.

SANTOS, Lidya B. *et al.* Avaliação energética do *biochar* obtido a partir da pirólise de pellets de pinus. **Jornal de Análise Térmica e Calorimetria**, v. 126, p. 1879-1887, 2016.

SARMENTO, Luiz Alberto Vieira *et al.* **Obtenção e separação de polifenóis de sementes de cacau por extração supercrítica associada a membranas**. 2007.

SEYE, O. *et al.* **Caracterização do caroço de açaí como insumo para geração de eletricidade via gaseificação**. In Proceedings of the Congresso Internacional Sobre Geração Distribuída E Energia No Meio Rural, Fortaleza, Brazil, 23–26 September 2008.

SINGH, N. B.; KUMAR, Ashwani; RAI, Sarita. Potential production of bioenergy from biomass in an Indian perspective. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 39, p. 65-78, 2014.

SILVA, Matheus Antônio da. **Avaliação do uso dos biocarvões de pinha (estróbilos de *Pinus elliottii*) como adsorvente em misturas com argila caulinita**. 2024.

SOHAIB, Q.; MUHAMMAD, A.; YOUNAS, M. Fast pyrolysis of sugarcane bagasse: Effect of pyrolysis conditions on final product distribution and properties. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects**, v. 39, n. 2, p. 184–190, 2017.

SOHI, Saran P. *et al.* A review of *biochar* and its use and function in soil. **Advances in agronomy**, v. 105, p. 47-82, 2010.

SOHI, Saran P. *et al.* *Biochar*, climate change and soil: A review to guide future research. **CSIRO land and water science report**, v. 5, n. 09, p. 17-31, 2009.

SOUZA, Anderson S.; DOS SANTOS, Walter NL; FERREIRA, Sérgio LC. Application of Box–Behnken design in the optimisation of an on-line pre-concentration system using knotted reactor for cadmium determination by flame atomic absorption spectrometry. **Spectrochimica acta part B: atomic spectroscopy**, v. 60, n. 5, p. 737-742, 2005.

SOZIM, Rafael et al. **Caracterização e pirólise de resíduo de chá-mate tostado para obtenção de biocarvão**. 2011.

STROHER, Gisely Luzia et al. Quantificação de ácidos graxos em diferentes tipos de biscoitos com ênfase em ácidos graxos trans. *Acta Scientiarum. Tecnologia*, v. 34, n. 1, p. 105-110, 2012.

TIEFENBACHER, Karl F. **The technology of wafers and waffles I: operational aspects**. Academic Press, 2017.

TOMASSONI, Fabíola et al. AVALIAÇÃO DA TOXICIDADE PELA UTILIZAÇÃO DO BIOCARVÃO COMO ADSORVENTE DE CORANTES TÊXTEIS. In: CIÊNCIA DAS PLANTAS: DESAFIOS E POTENCIALIDADES EM PESQUISA. Editora Científica Digital, 2023. p. 9-19.

TSAI, Chi-Hung et al. Thermochemical characterization of *biochar* from cocoa pod husk prepared at low pyrolysis temperature. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 8, p. 237-243, 2018.

TSAI, Wen-Tien et al. Conversão pirolítica de esterco de cavalo em *biochar* e suas propriedades termoquímicas e físicas. **Valorização de resíduos e biomassa**, v. 6, p. 975-981, 2015.

VALE, Ailton Teixeira do et al. Potencial energético da biomassa e carvão vegetal do epicarpo e da torta de pinhão manso (*Jatropha curcas*). **Cerne**, v. 17, p. 267-273, 2011.

VERNA, R. The history and science of chocolate. **Malays J. Pathol.**, v. 35, n. 2, p. 111-121, Dec. 2013. Disponível em: <https://www.mjpath.org.my/2013.2/history-and-science-of-chocolate.pdf>. Acesso em: jan. 2025.

VICENTE, Susana. Avaliação da fração lipídica de bolachas: estudo de mercado. **Actas do 8 Encontro de Química dos Alimentos**, 2007.

VIDAL, André Carvalho Foster; HORA, André Barros da. Perspectivas do setor de biomassa de madeira para a geração de energia. **BNDES Setorial**, n. 33, mar. 2011, p. 261-314, 2011.

WANG, B.; YAO, Z.; REINMÖLLER, M.; KISHORE, N.; TESFAYE, F.; LUQUE, R. Pyrolysis behavior, kinetics, and thermodynamics of waste pharmaceutical blisters under CO₂ atmosphere. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 170, n. 105883, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.105883>

WEISS, Fabrício *et al.* Pirólise de passivo de aterro de resíduos industriais para geração de carvão. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 27, n. 3, p. 523-531, 2022.

WOLLAGST, J.; ANKLAM, E. Review on polyphenols in *Theobroma cacao*: changes in composition during the manufacture of chocolate and methodology for identification and quantification. **Food Research International**, v. 33, n. 6, p. 423-447, 2000. DOI: 10.1016/S0963-9969(00)00068-5.

YU, X. et al. A CFD study of biomass pyrolysis in a downer reactor equipped with a novel gas-solid separator-II thermochemical performance and products. **Fuel Processing Technology**, v. 133, p. 51-63, 2015.

ZABANIOTOU, A.; IOANNIDOU, O.; ANTONAKOU, E.; LAPPAS, A. Experimental study of pyrolysis for potential energy, hydrogen and carbon material production from lignocellulosic biomass. *International Journal of Hydrogen Energy* (2008). In-Press: doi:10.1016/j.ijhydene.2008.02.080.

ZHANG, C.; ZHANG, Z.; ZHANG, L.; LI, Q.; LI, C.; CHEN, G.; ZHANG, S.; LIU, Q.; HU, X. Evolution of the functionalities and structures of *biochar* in pyrolysis of poplar in a wide temperature range. **Bioresource Technology**, v. 304, p. 1-39, 2020.

**APÊNDICE A - ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA O PODER
CALORÍFICO DO BIOCHAR**

Fonte	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	Estatística F	Valor-P
A: Tempo	0,0218	1	0,0218	0,02	0,8909
B: Temperatura	3,1979	1	3,1979	3,05	0,1412
C: Tipo de biomassa	1,5173	1	1,5173	1,45	0,2828
AA (quadrático do tempo)	1,7636	1	1,7636	1,68	0,2513
AA (quadrático do tempo)	1,7636	1	1,7636	1,68	0,2513
AB (interação tempo x temperatura)	9,4587	1	9,4587	9,02	0,0300
AC (interação tempo x biomassa)	0,0435	1	0,0434	0,04	0,8467
BB (quadrático da temperatura)	0,8343	1	0,8343	0,80	0,4132
BC (interação temperatura x biomassa)	1,3144	1	1,3144	1,25	0,3137
CC (quadrático da biomassa)	0,0068	1	0,0069	0,01	0,9386
Erro Total (Total Error)	5,2421	5	1,0484		
Total (Corrigido)	23,6	14			