

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

Luís Henrique Pereira Martins

**CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E POTENCIAL ENERGÉTICO DA
BIOMASSA DERIVADA DA CASCA DE COCO VERDE**

São Carlos – SP
17 de abril de 2025

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

Luis Henrique Pereira Martins

**CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E POTENCIAL ENERGÉTICO DA
BIOMASSA DERIVADA DA CASCA DE COCO VERDE**

Trabalho de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia Química
da Universidade Federal de São Carlos
para obtenção do Bacharelado em
Engenharia Química.

Orientadora: Professora Dr. Janaina Fernandes Gomes

São Carlos – SP
17 de abril de 2025

BANCA EXAMINADORA

Trabalho de Graduação apresentado no dia 17 de Abril de 2025, perante a seguinte banca examinadora:

Orientadora: Professora Dr. Janaina Fernandes Gomes - UFSCar

Professor da Disciplina: Prof Dr. Fabio Bentes Freire – UFSCar

Convidado: Prof Dr. Antonio Jose Goncalves da Cruz - UFSCar

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me permitir chegar até aqui e à minha família pelo apoio incondicional em todos os momentos difíceis que enfrentei durante a graduação. Eles sempre me deram forças para superar os desafios que a vida universitária em São Carlos impõe. Em especial, à minha mãe, Eliane, que sempre esteve ao meu lado, ouvindo-me e fazendo o possível para me ajudar nos piores momentos, e ao meu pai, José, que é meu exemplo de honestidade e perseverança.

Aos professores do Departamento de Engenharia Química (DEQ/UFSCar) pelo conhecimento transmitido a cada semestre, mesmo diante das adversidades, como as dificuldades impostas pela pandemia. Apesar de todos os desafios, não mediram esforços para auxiliar os alunos. Quero expressar um agradecimento especial à professora Janaína, minha orientadora ao longo deste último ano de trabalho de graduação, e à professora Paula, com quem tive o privilégio de estudar e também ser monitor nas disciplinas por mais de uma vez.

Agradeço também ao apoio recebido durante meu estágio no Instituto SENAI de Biomassa, em Três Lagoas. À minha grande amiga, Dra. Melina, registro meu reconhecimento pela dedicação e auxílio indispensável. À analista Daniella e ao meu supervisor, William, agradeço pelo tempo, pela estrutura oferecida e pelo suporte que tornaram possíveis os ensaios realizados.

Sou muito grato aos amigos que conquistei em São Carlos, que me acolheram e me ajudaram desde o primeiro dia na cidade. Destaco o Heyder, com quem compartilhei bons momentos na república; o Chrys, que esteve ao meu lado no cotidiano da engenharia e me apoiou em momentos decisivos da graduação; e, claro, o João Couto, com quem morei após a pandemia, enfrentando juntos os desafios que a graduação nos impôs.

Aos colegas e amigos que conheci em diversos projetos de extensão, no CAEQ, na Empresa Júnior, na Semana Acadêmica e na Atlética. A cada um de vocês, sou grato pelo apoio ao longo desses anos, pela caminhada conjunta e pelo aprendizado mútuo, que contribuíram imensamente para o meu crescimento pessoal e profissional. Espero poder retribuir todo o carinho que recebi e ajudar a todos a superar os desafios, assim como vocês têm me ajudado.

RESUMO

Desde o final do século XX, a crescente preocupação com o aumento das emissões de gases de efeito estufa e o consequente aquecimento global tem impulsionado a busca por fontes de energia renovável, como solar, eólica e biomassa, esta última envolvendo principalmente a queima de matéria orgânica proveniente de resíduos de madeira. Nesse contexto, a biomassa derivada do bagaço da casca do coco, embora menos explorada em comparação com outras fontes, como o bagaço de cana-de-açúcar, lenha de eucalipto e resíduos agrícolas, emerge como uma alternativa para a produção de energia renovável.

Além de seu potencial energético, a utilização do bagaço da casca do coco pode contribuir para a promoção da sustentabilidade ambiental, particularmente em áreas urbanas onde o descarte excessivo de resíduos de coco torna-se um problema. Locais como quiosques e instalações de processamento de coco são frequentemente responsáveis por altos volumes de resíduos que poderiam ser aproveitados para reduzir o acúmulo de lixo e, ao mesmo tempo, fornecer uma fonte de energia renovável. Investigar o bagaço de coco verde é essencial para compreender a sua composição química e o seu potencial como biomassa.

Assim, o objetivo deste trabalho é estudar a composição química do bagaço de coco verde com base nos procedimentos de normas específicas da ABNT NBR. Tal análise permite avaliar a presença de água (umidade), celulose e lignina, além de teores potencialmente significativos de carbono e nitrogênio, elementos fundamentais para determinar o potencial energético do material. Com base nesses resultados, serão exploradas as possibilidades de utilização do bagaço de coco verde como uma fonte sustentável de energia em aplicações industriais e/ou comerciais, visando avançar em discussões sobre a diversificação da matriz energética brasileira e possíveis estratégias para a mitigação dos impactos ambientais associados às fontes de energia convencionais.

Palavras chave: biomassa, casca de coco, energia renovável, caracterização, química, poder calorífico

ABSTRACT

Since the end of the 20th century, growing concerns about rising greenhouse gas emissions and the resulting global warming have driven the search for renewable energy sources, such as solar, wind and biomass, the latter mainly involving the burning of organic matter from wood waste. In this context, biomass derived from coconut husk bagasse, although less explored compared to other sources, such as sugarcane bagasse, eucalyptus firewood and agricultural waste, has emerged as an alternative for the production of renewable energy.

In addition to its energy potential, the use of coconut husk bagasse can contribute to promoting environmental sustainability, particularly in urban areas where excessive disposal of coconut waste becomes a problem. Locations such as kiosks and coconut processing facilities are often responsible for high volumes of waste that could be used to reduce the accumulation of garbage and, at the same time, provide a source of renewable energy. Investigating green coconut bagasse is essential to understanding its chemical composition and its potential as a biomass. Thus, the objective of this work is to study the chemical composition of green coconut bagasse based on the procedures of specific standards of ABNT NBR. This analysis allows the evaluation of the presence of water (moisture), cellulose and lignin, in addition to potentially significant levels of carbon and nitrogen, essential elements for determining the energy potential of the material. Based on these results, the possibilities of using green coconut bagasse as a sustainable source of energy in industrial and/or commercial applications will be explored, aiming to advance discussions on the diversification of the Brazilian energy matrix and possible strategies for mitigating the environmental impacts associated with conventional energy sources.

Keywords: Biomass, Coconut shell, Renewable energy, Characterization, Chemistry, Calorific value.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Avanço do cultivo de coqueiros nos estados brasileiros em 1990 e 2014	12
Figura 2 - Valor da produção de Coco no Brasil em 2022 em mil reais.....	13
Figura 3 - Constituição do fruto do coqueiro.....	14
Figura 4 - Aumento Global Médio De Temperatura Pós Período Pré-Industrial.	18
Figura 5 - Cocos descartados como resíduo e pedaços da casca.....	22
Figura 6 - Moinho de facas da Marconi, modelo MA683/8.....	23
Figura 7 - Amostra de casca de coco seca, moída e peneirada.....	23
Figura 8 – Analisador de umidade Shimadzu, modelo MOC63u.....	24
Figura 9 – Forno mufla utilizado neste estudo e seu painel de temperatura.....	26
Figura 10 - Equipamento de Análise Elemental modelo Flash Smart CHNS/O da Thermo Fisher Scientific.....	28
Figura 11 - Equipamento de FTIR Nicolet iS10 da Thermo Scientific.....	29
Figura 12 - Conjunto de Soxhlets e balões montados no extrator.....	32
Figura 13 –Vista frontal e diagonal de uma autoclave vertical de 300L.....	34
Figura 14 - Equipamento HPLC.....	35
Figura 15 - Informações sobre a coluna usada no HPLC.....	35
Figura 16 - Espectrofotômetro Gehaka modelo VIS-340G UV-Visível.....	37
Figura 17 - Bomba calorimétrica.....	39
Figura 18 - Cadinho de cobre com amostra e pavio preparado para inserção na bomba calorimétrica.....	40
Figura 19 – Espectro de FTIR da biomassa de casca de coco verde.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Umidade in Natura da biomassa de casca de coco verde	43
Tabela 2 – Teor de umidade após secagem e moagem das amostras de biomassa de casca de coco verde.	44
Tabela 3 – Teor de voláteis da biomassa de casca de coco verde.....	44
Tabela 4 – Teor de cinzas da biomassa de casca coco verde	45
Tabela 5 – Teor de carbono fixo da biomassa de casca coco verde	45
Tabela 6 – Análise Elementar (CHNS-O) da biomassa de casca de coco verde	46
Tabela 7 – Resultados de Teor de Extrativos.....	50
Tabela 8 – Resultados HPLC da biomassa de coco verde.....	51
Tabela 9 - Teor de ligninas na biomassa de casca de coco verde.....	53
Tabela 10 – Poder Calorífico PCS, PCI e PCU da casca de coco verde.....	54

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais usos dos resíduos de coco	16
Quadro 2 - Metodologias empregadas na caracterização do bagaço de casca de coco.	21
Quadro 3 - Programação do equipamento para o estudo CHNS	28
Quadro 4 - Condições do HPLC para determinação de carboidratos.	36
Quadro 5 - Atribuições espectrais de infravermelho (IR) com base nos números de onda.	48

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1. HISTÓRICO DA PRODUÇÃO DE COCO NO MUNDO	12
2.2. PRODUÇÃO DE COCO NO BRASIL.....	13
2.3. CONSTITUIÇÃO E DESTINO DO COCO VERDE	14
2.4. PROCESSOS DE APROVEITAMENTO DO RESÍDUO DE COCO	15
2.5. FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA LIMPA	17
2.6. POTENCIAL CALORIFICO	18
3. OBJETIVOS GERAIS.....	20
3.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
4. METODOLOGIA.....	21
4.1. AMOSTRAS E PREPARO PARA ANÁLISES.....	21
4.2. ANÁLISES REALIZADAS.....	23
4.2.1. Umidade <i>in Natura</i>	23
4.2.2. Análise Imediata.....	24
4.2.3. Análise Elementar (CHNS-O).....	27
4.2.4. Análise de Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier – FTIR.....	28
4.2.5. Teor de Extrativos, Ligninas, e Cadeias Carbônicas.....	30
4.2.6. Poder Calorifico.....	38
4.2.7. Tratamento de Dados.....	41
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
5.1. Umidade <i>in Natura</i>	43
5.2. Análise Imediata	43
5.3. Resultados Análise Elementar.....	46
5.4. Análise FTIR.....	47
5.5. Análise de Extrativos	50

5.6.	Análise HPLC	51
5.7.	Análise de Ligninas	53
5.8.	Análise do Poder Calorífico	54
6.	CONCLUSÃO E PERSPECIVAS	56
7.	BIBLIOGRAFIA	58

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com o aumento das emissões de gases de efeito estufa, impulsionada pelo aquecimento global desde o final do século passado, tornou-se uma questão urgente e premente. As ondas de calor constantes em todo o mundo são um sintoma alarmante desse fenômeno, representando um desafio significativo que a humanidade enfrenta. Segundo o relatório da ONU de 2023 (WMO, 2023), a temperatura média da superfície do planeta aumentou 1,4°C em relação à média do período pré-industrial de 1850-1900, e 2023 foi o ano mais quente registrado na história.

A principal causa do aquecimento global, conforme destacado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA, 2015), é a emissão de gases do efeito estufa, com destaque para o dióxido de carbono (CO₂), seguido pelo metano e óxido nitroso. Diante desse cenário, a busca pela mitigação das emissões de CO₂ e a transição para fontes de energia renovável e limpa, como solar, eólica e biomassa, tornaram-se prioridades cruciais.

No Brasil, as fontes de biomassa incluem tradicionalmente o bagaço de cana-de-açúcar, lenha de eucalipto e resíduos agrícolas. No entanto, outras fontes menos exploradas, como cascas de arroz e casca de coco verde, despertam interesse devido ao seu potencial para mitigar resíduos e contribuir para a produção de energia renovável e limpa. A casca de coco verde, em particular, destaca-se pela quantidade significativa de resíduos gerados diariamente em quiosques segundo a Embrapa (2019) estima-se que, em 2007, a produção de resíduos do coqueiro, apenas na região Nordeste do Brasil, foi de aproximadamente 729 mil toneladas de casca, onde na maioria das vezes o descarte adequado não é realizado.

De acordo com o Censo Agropecuário (IBGE, 2022), o Brasil possuía uma área cultivada de coqueiros de 189.525 hectares, produzindo aproximadamente 1.829.612.000 frutos, com peso médio de casca de 0,9 Kg cada. Apesar das diversas aplicações da casca de coco verde, como na fabricação de artesanatos, vasos, e adubos orgânicos, o descarte inadequado ainda é uma prática comum, resultando na perda de um recurso valioso para a indústria e a agricultura.

O aproveitamento dos resíduos de cascas de coco verde no Brasil é alarmantemente baixo, apenas 10% do montante gerado é aproveitado, de acordo

com Sindicoco (2023). A implementação eficaz da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei Federal 12.305/2010, enfrenta desafios significativos em muitos municípios brasileiros, demonstrando a necessidade de políticas mais concretas de coleta e incentivo à pesquisa sobre o potencial energético da casca de coco verde.

Nesse contexto, torna-se evidente a necessidade de buscar resultados que demonstrem o potencial energético dos resíduos da casca do coco verde. Isso poderia impulsionar o avanço de discussões, planejamentos e realização ações coordenadas entre setores público e privado para promover a coleta, a reciclagem e o uso eficiente desses resíduos como uma fonte sustentável de biomassa. Medidas como essa são essenciais para a contenção das mudanças climáticas e para a transição para uma economia mais sustentável.

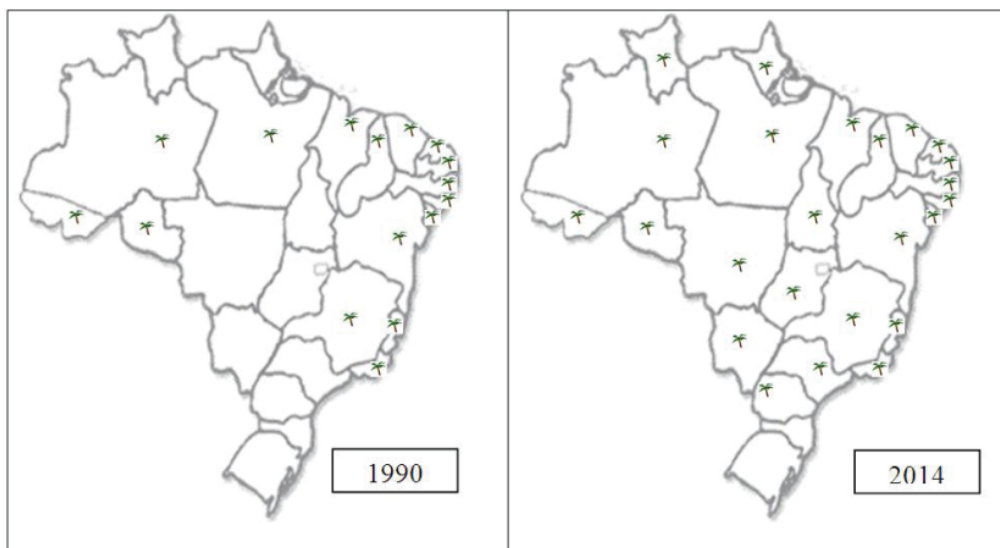
Neste estudo, será realizada uma análise da casca do coco verde, com o objetivo de obter uma caracterização química detalhada, identificando os compostos presentes e avaliando seu impacto quando utilizada como fonte de energia renovável na forma de biomassa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. HISTÓRICO DA PRODUÇÃO DE COCO NO MUNDO

De acordo com Silva (2014), o coqueiro tem suas origens na Índia, enquanto Silva e Jerônimo (2012) sugerem que ele se originou entre as Filipinas e a Indonésia. Contudo, os autores concordam que o coqueiro se deslocou para a Índia e, posteriormente, para o leste africano, onde foi encontrado por europeus, antes de finalmente chegar ao continente americano e, conseqüentemente, ao Brasil por meio da colonização portuguesa, onde ele foi disseminado pelo nordeste brasileiro e, por fim, nas últimas décadas o cultivo cresceu e chegou às diferentes regiões do país, como mostra a Figura 1.

Figura 1 - Avanço do cultivo de coqueiros nos estados brasileiros em 1990 e 2014



Fonte: Martins (2014)

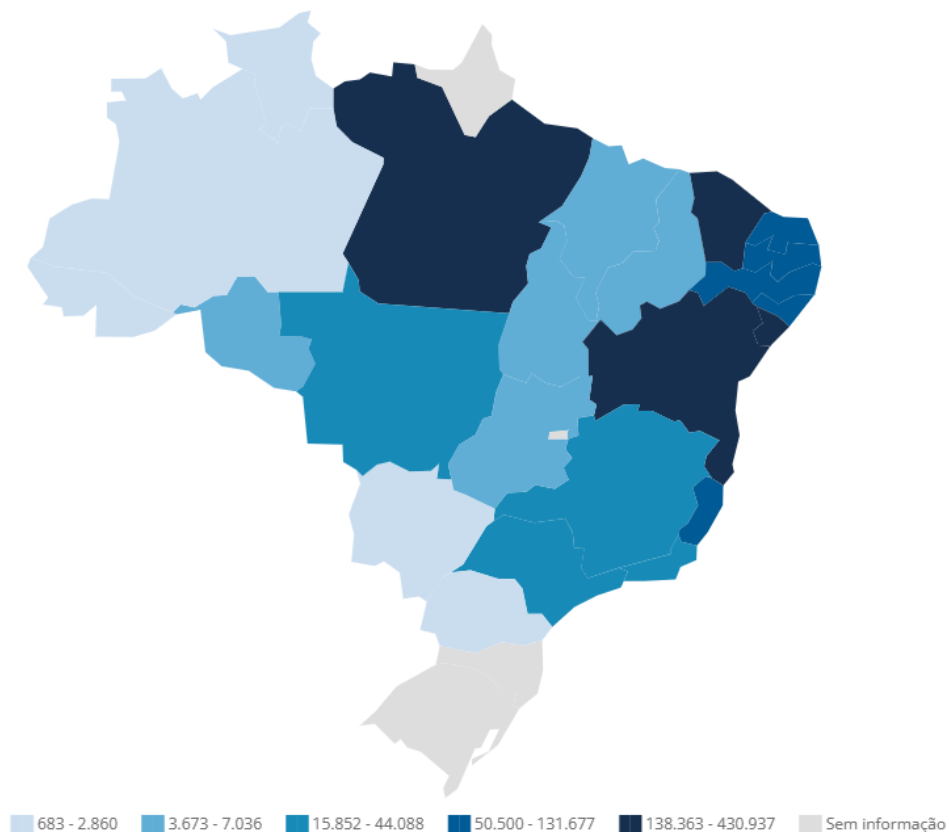
Em 1998, segundo Martins (2011), a produção mundial de coco verde atingiu em torno de 49 milhões de toneladas, provenientes de uma área colhida de 11,2 milhões de hectares. Já em 2008, após uma década, a produção aumentou cerca de 20%, atingindo aproximadamente 60,7 milhões de toneladas. A área colhida manteve-se praticamente a mesma, com 11,2 milhões de hectares, o que representou um importante incremento na produtividade global. No entanto, na última década, o incremento foi menor. Em 2023, a produção mundial chegou a 64,7 milhões de toneladas, segundo a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO, 2025). Neste cenário, os países da Ásia, como Sri Lanka, Filipinas, Índia, Tailândia e Indonésia, ocupam aproximadamente 84,7% da produção mundial de

cocos, enquanto o restante é distribuído entre África, América Latina, Oceania e Caribe.

2.2. PRODUÇÃO DE COCO NO BRASIL

Segundo os dados do Censo Agropecuário (IBGE, 2022), em 2022, o território brasileiro abrangia 189 mil hectares destinados ao cultivo de coqueiros, resultando em uma produção estimada de cerca de 1,8 bilhão de frutos por ano, o que equivale a aproximadamente 2,5 milhões de toneladas. Segundo a FAO (2025), o Brasil é o 4º país que mais produz coco verde no mundo, perdendo somente para os asiáticos. Atualmente, o país produz cerca de 2,9 milhões de toneladas de coco. Os estados do Pará, Bahia e Ceará lideram a produção nacional, com mais de 175 milhões de frutos, movimentando juntos mais de 600 milhões de reais anualmente, conforme mostra a Figura 2.

Figura 2 - Valor da produção de Coco no Brasil em 2022 em mil reais



Fonte: Censo Agropecuário (IBGE, 2022)

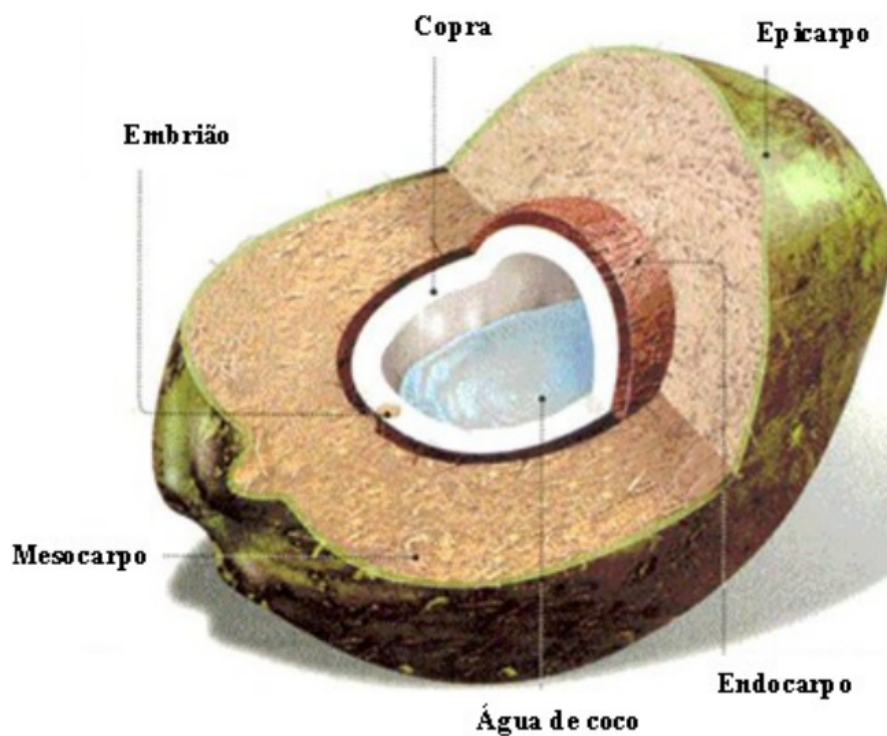
A produção nacional de coco verde se beneficia do clima tropical brasileiro e da falta de sazonalidade, durando o ano todo, ele é uma das frutas mais populares nos

litorais brasileiros, especialmente durante os períodos de calor, apreciado especialmente por suas propriedades nutricionais. De acordo com Bontempo (2008), a água de coco, destacada como bebida isotônica e reidratante, tem contribuído significativamente para o aumento da cultura do coco no Brasil, incentivando a comercialização tanto in natura quanto envasada.

2.3. CONSTITUIÇÃO E DESTINO DO COCO VERDE

O coco verde fruto do coqueiro, pesa em média de 900g a 1500g a depender a região de plantio e das condições climáticas, se destacando principalmente pela sua umidade que representa entre 80 e 90% da sua massa. Ele é constituído por água de coco, copra (poupa da castanha do coco), endocarpo, Mesocarpo (fibra e pó) e uma pequena película verde exterior chamada de epicarpo, como representado na Figura 3.

Figura 3 - Constituição do fruto do coqueiro



Fonte: Mattos *et al.* (2011).

A depender de seu destino final, o coco pode ser classificado em dois tipos de matéria-prima:

- Coco verde: Colhido com entre 6 e 7 meses de idade, frequentemente utilizado para consumo em quiosques, atingindo o nível máximo de volume de água de coco, em torno de 250 a 300 ml (Embrapa, 2019).
- Coco seco: colhido com 11 ou 12 meses de idade, e geralmente destinado a processos industriais, como a produção de coco ralado.

É importante destacar que, após a extração de seus principais produtos, como a água de coco e a copra, o resíduo restante do coco representa cerca de 80% de seu peso bruto, consistindo em cascas formadas pelo mesocarpo e o epicarpo. Em sua maioria, esses resíduos são descartados em lixões e aterros sanitários em todo o país, o que, devido ao seu alto volume de descarte, não está em conformidade com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estabelecida pela Lei Federal 12.305/2010. Tal legislação proíbe esse tipo de descarte devido à dificuldade de decomposição, que pode levar de 8 a 10 anos para se completar.

Segundo a PNRS, o ideal seria o uso da logística reversa com um conjunto de ações, procedimentos governamentais e privados que gerem meios para viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos de cascas de coco verde ao setor empresarial, para aproveitamento como adubo, ou insumo para produção energética, em seu ciclo ou em outro ciclo produtivo de cultura agrícola. Além disso, é fundamental buscar outras destinações ambientalmente adequadas para esses resíduos, garantindo uma gestão sustentável e responsável.

É relevante observar que, de acordo com uma pesquisa recente, os índices de aproveitamento dos resíduos de cascas de coco verde no Brasil foram alarmantemente baixos, com apenas 10% do montante gerado sendo utilizado Sindicoco (2023). Vale ressaltar que o país consumiu aproximadamente 2,47 milhões de toneladas de coco verde em 2020, conforme indicado por Agrostat (2021), o que evidencia que mais de 1,8 milhões de toneladas de resíduos não foram devidamente aproveitadas.

2.4. PROCESSOS DE APROVEITAMENTO DO RESÍDUO DE COCO

A partir da análise de trabalhos relatados na bibliografia como mostrado no Quadro 1 é notável a existência de uma boa quantidade de aplicações para os resíduos do coco e a cada ano este leque de possibilidades aumenta mais, tendo em vista novas pesquisas, e a enorme quantidade de resíduos gerada anualmente e o potencial de valorização econômica através de diversas formas de aplicação conforme

consta no Quadro 1. Diante dessas formas de aproveitamento o descarte dos resíduos de coco nos aterros pode ser encarado como desperdício de um insumo para geração de produtos de valor agregado.

Quadro 1 - Principais usos dos resíduos de coco

Resíduo	Aplicação	Produto	Referência
Pó da casca de coco	Agricultura e jardinagem	Substrato para retenção de umidade e correção da estrutura do solo	ROSA, 2011
Fibras da casca do coco	Industria automobilística, eletrodomésticos, embalagens e isolamento térmico e acústico	Materiais compósitos	SOUZA, 2015
Fibras da casca do coco	Ornamentação	Vasos, tapetes, mantas anti-erosão	ROSA, 2011
Fibras da casca do coco	Construção civil	Painéis de cimento	FERRAZ, 2011
Fibras da casca do coco	Tratamento de efluentes	Material adsorvente	MONTEIRO, 2009
Óleo de coco	Alimentícia	Utilizado no preparo de alimentos	AZAMBUJA, 2016
Endocarpo	Energética	Carvão vegetal (briquetes)	ANUÁRIO, 2016
Fibras da casca do coco	Energética	Bioetanol	GONÇALVES, 2013
Óleo de coco	Energética	Biodiesel	ARAÚJO, 2008
Licor da fibra do coco	Energética	Biogás	LEITÃO, 2009
Óleo de coco	Medicamentos/Cosméticos	Anti-inflamatório	RIBEIRO, 2017
Fibra de coco	Medicamentos/Cosméticos	Anti-inflamatório	G1, 2016

Fonte: Adaptado de (OLIVEIRA, 2017)

A partir das propriedades físicas e biológicas dos resíduos, observa-se que as fibras derivadas das cascas do coco verde possuem um alto valor devido à sua natureza renovável, biodegradável e à sua relação custo-benefício favorável. No contexto da construção civil, sua resistência as torna particularmente adequadas para a produção de painéis de cimento, proporcionando maior durabilidade, isolamento térmico e acústico. Para assegurar sua compatibilidade com o cimento, são realizados tratamentos para aprimorar a aderência. Além disso, as fibras de coco têm sido objeto de estudos para compósitos em diversas indústrias, beneficiando-se de processos de tratamento para maximizar sua eficácia. Sua capacidade de absorção elevada também as torna eficientes no tratamento de efluentes, contribuindo para a remoção de óleos e íons metálicos.

O pó proveniente da casca de coco é utilizado como substrato ativo após o processo de compostagem, o que melhora a estrutura do solo e reduz a necessidade de fertilizantes. Por sua vez, o óleo de coco, rico em ácido láurico, é amplamente empregado nas indústrias cosmética e alimentícia, devido às suas propriedades imunológicas e anti-inflamatórias.

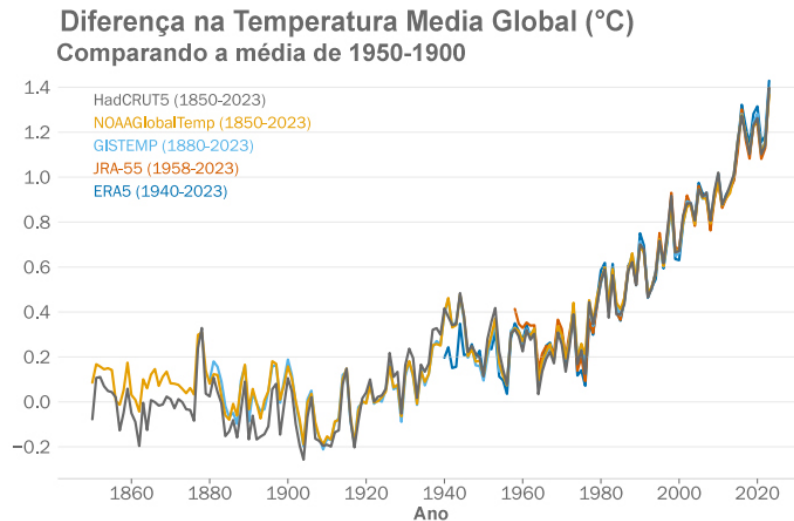
2.5. FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA LIMPA

Atualmente, o mundo enfrenta uma crescente preocupação com o aquecimento global, tornando-se uma questão de urgência e importância extrema. As persistentes ondas de calor observadas globalmente são sintomas alarmantes desse fenômeno, representando um desafio significativo para a humanidade. Conforme destacado no relatório da Organização das Nações Unidas (ONU) de 2023 (WMO, 2023), a temperatura média da superfície terrestre aumentou em 1,4°C em relação à média do período pré-industrial de 1850-1900, sendo o ano de 2023 registrado como o mais quente da história até então. Com base na Figura 4 podemos notar a evolução do aumento da temperatura na terra com base em cinco banco de dados que compõe o relatório da ONU. O aquecimento global é ocasionado pelo acúmulo gradual de gases de estufa, como CO₂ e CH₄, na atmosfera.

O Brasil figura como signatário do Acordo de Paris, um pacto estabelecido entre 195 nações com o propósito de mitigar as emissões de gases de efeito estufa. O objetivo primordial é limitar o aumento da temperatura global a menos de 2°C acima dos níveis pré-industriais. Nesse sentido, além da necessidade de redução das emissões, o país se compromete a ampliar a utilização de fontes energéticas

renováveis, incrementar a participação de bioenergias em sua matriz energética, combater o desmatamento e adotar tecnologias limpas nos setores industriais.

Figura 4 - Aumento Global Médio De Temperatura Pós Período Pré-Industrial.



Fonte: Adaptado de (WMO, 2023)

No contexto do aproveitamento energético, conforme evidenciado na Quadro 1, são identificados quatro potenciais aplicações para os resíduos do coco, particularmente a produção de biogás, biodiesel, bioetanol e a utilização de briquetes, os briquetes, feitos a partir de derivados do endocarpo, a parte mais densa e com menor teor de umidade do coco verde, podem ser utilizados como coque para queimas, liberando um considerável poder calorífico.

2.6. POTENCIAL CALORIFICO

A queima de biomassa para geração de energia é influenciada por diversos fatores, incluindo o teor de umidade, o tipo de material, o tamanho e a compactação das fibras, além da idade da madeira. O teor de umidade é um fator crucial, pois uma parte da energia liberada durante a combustão é utilizada para evaporar a água contida na biomassa. Além disso, a densidade básica da madeira, aumenta com a idade, e também afeta o poder calorífico, uma vez que madeira mais densa possui maior massa por unidade de volume e, portanto, mais energia disponível.

A energia térmica liberada na combustão é avaliada por três tipos de unidades de poder calorífico: superior, inferior e útil. De acordo com Embrapa (2019), o Poder Calorífico Superior (PCS) é a quantidade de calor liberado quando a água formada durante a queima permanece em estado líquido (volume constante). O Poder

Calorífico Inferior (PCI) refere-se à energia liberada quando a água está em estado gasoso (volume variável). Já o Poder Calorífico Útil (PCU) é a quantidade de calor disponível após descontar a energia necessária para evaporar a umidade da madeira, comumente esta última é a utilizada para avaliar a eficiência energética da queima do material. Assim, o PCS, PCI e PCU são medidas que ajudam a quantificar a eficiência energética da biomassa considerando diferentes condições de umidade e estado da água.

De acordo com a Embrapa (2019), o potencial calorífico do mesocarpo e demais partes da casca do coco é ligeiramente inferior ao do endocarpo, o que resulta em sua utilização menos frequente para fins energéticos. Normalmente, esses resíduos têm mais chances de serem empregados na forma de biomassa quando são provenientes de processos industriais em empresas que possuem sistemas de geração de energia a partir de caldeiras de biomassa.

Nesse cenário, torna-se fundamental realizar uma caracterização química do mesocarpo do coco a fim de compreender as razões por trás de seu menor poder calorífico. Além disso, uma análise dos potenciais ganhos energéticos na matriz nacional com o uso de resíduos de coco é necessária. Isso poderia catalisar discussões, planejamentos e ações coordenadas entre os setores público e privado, visando promover a coleta, a reciclagem e o uso eficiente desses resíduos como fonte sustentável de biomassa.

3. OBJETIVOS GERAIS

O presente estudo tem como objetivo investigar a composição química do bagaço de coco verde, seguindo os parâmetros estabelecidos pelas normas brasileiras, e avaliar o seu potencial como fonte de energia sustentável.

3.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar os teores de umidade, lignina, carbono, nitrogênio, e demais análises relevantes para a determinação do potencial energético do material. Essa avaliação visa explorar as potenciais aplicações do bagaço de coco verde como uma fonte de energia sustentável em contextos industriais e comerciais.
- Analisar as implicações ambientais e econômicas associadas à utilização do bagaço de coco verde como fonte de energia, em comparação com fontes convencionais. Isso incluirá uma investigação detalhada sobre os potenciais processos de conversão de biomassa em energia e uma avaliação crítica dos impactos socioeconômicos e ambientais dessas alternativas energéticas.
- Propor estratégias para a integração do bagaço de coco verde na matriz energética brasileira, com foco na mitigação dos impactos ambientais associados às fontes de energia tradicionais. Isso incluirá a discussão de possíveis programas de desenvolvimento tecnológico voltados para a promoção desta fonte de energia renovável, contribuindo assim para o avanço das discussões sobre a diversificação energética e a sustentabilidade ambiental no contexto brasileiro.

4. METODOLOGIA

Com o objetivo de realizar a caracterização química e determinar o potencial calorífico do bagaço de casca de coco, adotou-se como método a caracterização via normas ABNT NBR 16550, 8112 e NREL/TP-510-42618. Essas normas são utilizadas para a caracterização química do bagaço de cana-de-açúcar, sendo viáveis, de forma análoga, para a análise de grande parte das biomassas, incluindo o bagaço de coco. Para a determinação do potencial calorífico da amostra, foi utilizada a norma ABNT NBR 8633 (1984), além de equipamentos com certificação e calibração atualizadas, garantindo resultados confiáveis.

Vale ressaltar que todos os testes foram realizados entre janeiro e março de 2024, no Instituto Senai de Inovação em Biomassa, localizado em Três Lagoas, Mato Grosso do Sul. O instituto dispõe de todo o aparato técnico necessário para a caracterização química de biomassas e emprega procedimentos internos de análise, como a POP-LPQ010, que detalha os procedimentos de análise imediata. O Quadro 2 apresenta as análises realizadas e as normativas aplicadas como metodologia.

Quadro 2 - Metodologias empregadas na caracterização do bagaço de casca de coco.

Análises realizadas	Método
Análise de Umidade in Natura	Método Termogravimétrico
Análise Imediata: Umidade, Cinzas, Volatilidade e Carbono Fixo	ABNT NBR 8112
Análise Elementar (CHNS-O)	Método Pregl-Dumas
Análise FTIR	Método da Reflectância Total Atenuada (ATR)
Análise do Teor de Extrativos	ABNT NBR 16550 e NREL/TP-510-42618
Análise de Poder Calorífico	ABNT NBR 8633

Fonte: Autor

4.1. AMOSTRAS E PREPARO PARA ANÁLISES

Quatro unidades de coco, após consumo da água de coco, foram fornecidas para o presente estudo por comerciantes de quiosques da Lagoa Maior, um dos pontos turísticos da cidade de Três Lagoas, no interior do Mato Grosso do Sul. Para o

consumo da água de coco normalmente se corta uma lasca do coco na sua parte inferior para apoiá-lo sobre a mesa e outra lasca na parte superior para poder inserir o canudo como mostra a Figura 5.

Figura 5 - Cocos descartados como resíduo e pedaços da casca.



Fonte: Autor

Esses cocos foram totalmente descascados para que se pudesse analisar apenas o mesocarpo e o epicarpo. As cascas foram pesadas gerando um resíduo de aproximadamente 2,5 Kg. Cerca de 10g foram separados para analisar sua umidade in natura na mesma manhã para minimizar os impactos do ambiente externo.

Todo restante da amostra foi mantido em estufa a 85°C por 48 horas para secagem. Em seguida, o material foi moído em um moinho de facas da Marconi, modelo MA683/8, ilustrado na Figura 6, passado por peneiras com aberturas de granulometrias de 5 mm e, posteriormente, 3 mm. O objetivo destas operações foi reduzir a granulometria das fibras da casca, resultando na amostra final mostrada na Figura 7, que será usada para a análise de caracterização química.

Figura 6 - Moinho de facas da Marconi, modelo MA683/8



Fonte: Autor

Figura 7 - Amostra de casca de coco seca, moída e peneirada



Fonte: Autor

4.2. ANÁLISES REALIZADAS

4.2.1. Umidade *in Natura*

A determinação do teor de umidade *in natura* é realizada visando se obter o teor de umidade do fruto natural sem preparo prévio, imediatamente após o corte da casca, este teste foi realizado com um analisador de umidade automatizado da marca Shimadzu, modelo MOC63u, conforme ilustrado na Figura 8. Durante a análise, o equipamento aquece a amostra gradativamente até 105°C, evaporando a água até que a variação da massa seja inferior a 0,05% em um minuto.

Figura 8 – Analisador de umidade Shimadzu, modelo MOC63u



Fonte: Autor

Materiais Utilizados:

- Analisador de umidade Shimadzu, modelo MOC63u;
- Espátula;
- Pratinho de papel alumínio;

4.2.1.1. Determinação Umidade in Natura

Pesou-se um grama da amostra em um pratinho de alumínio dentro do analisador de umidade e fechou-se o equipamento para iniciar o aquecimento, até que não houvesse variação de massa e então foi anotado o valor percentual de umidade mostrado na tela, devido a facilidade de reprodução e notada uma pequena variabilidade dos resultados, foram realizados 6 ensaios.

4.2.2. Análise Imediata

A análise imediata recebe essa denominação por utilizar a mesma amostra de forma consecutiva em quatro ensaios, os quais são realizados imediatamente após o término do anterior. Esses ensaios foram realizados em triplicata. Nos experimentos, utilizou-se uma amostra previamente seca em estufa, moída e peneirada, que foi posteriormente mantida à temperatura ambiente e em contato com o ar, visando obter uma condição semelhante à de uma biomassa para queima. Dessa forma, por meio da análise imediata, foram determinados os teores de umidade, material volátil, cinzas e carbono fixo da amostra.

Materiais Utilizados:

- Cadinho;
- Espátula;
- Estufa;
- Forno Mufla;
- Balança analítica;
- Dessecador;
- Pinça Tenaz.

4.2.2.1. Determinação do Teor de Umidade (U%)

Diferentemente da umidade in natura, que determina o teor de água presente na amostra natural logo após o corte do fruto verde, o teor de umidade na análise imediata quantifica a quantidade de água absorvida pela amostra do ambiente após o preparo prévio, na estufa, moagem e peneiramento. Esse teor é comumente utilizado na determinação do poder calorífico e da eficiência de queima da biomassa. Para tal, segue-se o procedimento descrito a seguir.

Pesou-se aproximadamente 1,0 g de amostra, com precisão de 1 mg em um cadinho sem tampa. Em seguida, levou-se para estufa a 105 ± 5 °C durante 90 minutos. Logo após, o cadinho foi retirado da estufa e colocado no dessecador para resfriar. O cálculo do Teor de Umidade (%U) foi realizado através da Equação 1.

$$\%U = \frac{m_1 - m_2}{m_{amostra}} * 100 \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

- %U: teor de umidade da amostra, expressa em porcentagem (%);
- m_1 : massa do cadinho com amostra antes de permanecer na estufa (seco), expressa em gramas (g);
- m_2 : massa do cadinho com amostra após a retirada da estufa, expressa em gramas (g);
- $m_{amostra}$: massa da amostra inicial, expressa em gramas (g).

4.2.2.2. Determinação do Teor Material Volátil (%V)

A determinação do teor de material volátil foi realizada em uma etapa posterior à de remoção de umidade da amostra. Enquanto era realizada a pesagem para o teor

de umidade o forno mufla foi previamente aquecido a uma temperatura de 950 ± 10 °C, e em seguida as amostras nos cadinhos tampados foram levadas a mufla, devido à alta temperatura e o risco de quebra do cadinho o forno mufla foi aberto com sua porta ficando na horizontal como mostrado na Figura 9, e o cadinho com a amostra foi colocado sobre a porta da mufla durante 2 minutos. A seguir, o cadinho tampado com a amostra foi colocado dentro do forno e a porta do equipamento foi fechada, mantendo a amostra por 6 minutos a 950 ± 10 °C. Após a retirada da amostra do forno mufla ela foi resfriada em dessecador e realizou-se a determinação da massa final.

Figura 9 – Forno mufla utilizado neste estudo e seu painel de temperatura.



Fonte: Autor

O teor de material volátil (%V) foi calculado utilizando a Equação 2.

$$\%V = \frac{m_2 - m_3}{m_{amostra}} * 100 \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

- %V: teor de material volátil da amostra, expresso em porcentagem (%);
- m_2 : massa do cadinho com amostra após a retirada do material da estufa, expressa em gramas (g);
- $m_{amostra}$: massa da amostra inicial, expressa em gramas (g);
- m_3 : massa do cadinho com amostra após a retirada do material do forno mufla, expressa em gramas (g).

4.2.2.3. Determinação do Teor de Cinzas (%Z)

A determinação do teor de cinzas foi realizada em uma etapa posterior à de remoção de compostos voláteis da amostra, que foi então calcinada em um cadinho sem tampa a uma temperatura de 575 ± 25 °C por 4 horas. A seguir a amostra foi resfriada em um dessecador e, na sequência a massa do conjunto cadinho e amostra foi aferida. Para o cálculo do teor de cinzas (%Z) utilizou-se a Equação 3

$$\%Z = \frac{m_3 - m_4}{m_{amostra}} * 100 \quad \text{Equação (3)}$$

Onde,

- %Z: teor de cinzas da amostra, expresso em porcentagem (%);
- m_4 : massa do cadinho com amostra após o processo de calcinação, expressa em gramas (g);
- m_3 : massa do cadinho com amostra após a retirada do material do forno mufla, expressa em gramas (g).
- $m_{amostra}$: massa da amostra inicial, expressa em gramas (g).

4.2.2.4. Determinação do Teor de Carbono Fixo (%CF)

O teor de carbono fixo (%CF) foi determinado subtraindo-se da totalidade da amostra (100%) os teores de umidade (%U), material volátil (%V) e cinzas (%Z), como consta na Equação 4.

$$\%CF = 100 - \%Z - \%V - \%U \quad \text{Equação (4)}$$

Onde,

- %CF: teor de carbono fixo da amostra, expresso em porcentagem (%);
- %U: teor de umidade da amostra, expresso em porcentagem (%);
- %V: teor de material volátil da amostra, expresso em porcentagem (%);
- %Z: teor de cinzas da amostra, expresso em porcentagem (%).

4.2.3. Análise Elementar (CHNS-O)

A análise elementar possibilita determinação das concentrações elementares de carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N), enxofre (S) e oxigênio (O) da casca de coco. Estes estudos foram realizados por um analista de laboratório experiente e apenas em duplicata, devido ao alto custo desta análise. Utilizou-se um analisador

elementar modelo Flash Smart CHNS/O da Thermo Fisher Scientific, conforme apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Equipamento de Análise Elementar modelo Flash Smart CHNS/O da Thermo Fisher Scientific.



Fonte: Adaptado de Thermo (2017)

Quadro 3 - Programação do equipamento para o estudo CHNS

Temperatura (°C)	Fornalha direita O₂	Fornalha esquerda CHNS	Forno
	Off	950	65
Tempo (s)	Ciclo de análise	Injeção da amostra	Injeção de oxigênio
	720	12	5
Vazão de gases (mL/min)	Arraste (He)	Oxigênio	Referência (He)
	140	250	100

4.2.4. Análise de Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier – FTIR

O método da espectroscopia de infravermelho é utilizado para identificar materiais e substâncias por meio de sua assinatura espectral. Essa metodologia emprega a energia da radiação eletromagnética na faixa do infravermelho médio, que é absorvida como energia de vibração molecular. Cada molécula absorve de maneira característica, gerando comprimentos de onda distintos. Esses comprimentos de onda são então convertidos em um espectro por meio da Transformada de Fourier, permitindo a caracterização e identificação das moléculas presentes em na amostra de casca de coco.

Este método tradicionalmente utiliza pastilhas de CaF_2 ou KBr nos equipamentos de FTIR. No entanto, o uso dessas pastilhas pode tornar o estudo relativamente mais caro e apresenta algumas desvantagens em comparação com a nova técnica baseada no uso do diamante de ATR (Reflexão Total Atenuada). O diamante, sendo um material mais resistente e capaz de suportar amostras rígidas, abrasivas e produtos químicos agressivos sem risco de danos, o que o torna muito melhor para a análise de materiais. A técnica com diamante elimina a necessidade de preparar pastilhas, proporcionando economia de tempo e minimizando erros relacionados ao preparo manual, como a formação de pastilhas opacas ou inconsistentes. Outra importante vantagem é a possibilidade de análise direta de sólidos, líquidos e géis, sem as limitações relacionadas à higroscopicidade e fragilidade das pastilhas de KBr ou à restrição na faixa de transmissão espectral do CaF_2 . Assim, o uso do diamante garante maior durabilidade, facilidade de uso e resultados mais consistentes.

Desta maneira, a amostra foi analisada pelo equipamento Nicolet iS10 da Thermo Scientific, conforme ilustrado na Figura 11, utilizando o método de espectroscopia de infravermelho com diamante de ATR (Reflexão Total Atenuada). Os experimentos foram realizados com 64 varreduras (scans) e uma resolução de 4 cm^{-1} , cobrindo a faixa espectral de 4000 cm^{-1} a 525 cm^{-1} , em modo de transmitância.

Figura 11 - Equipamento de FTIR Nicolet iS10 da Thermo Scientific.



Fonte: THERMO FISHER SCIENTIFIC

Materiais utilizados

- Equipamento de FTIR Nicolet iS10 da Thermo Scientific;
- Computador integrado;
- Espátula;
- Papel absorvente;
- Álcool etílico.

4.2.4.1. Determinação

Em um experimento típico, o software da Thermo Scientific foi iniciado e configurado para a análise. A lente de leitura, que possui um pequeno orifício de 5 mm de diâmetro e 3 mm de profundidade, com o diamante de ATR no fundo, foi aberta manualmente para ser limpa com o auxílio de papel e álcool. Em seguida, a lente de leitura foi fechada para que o software pudesse realizar a leitura de um perfil branco sem amostra, a fim de capturar os dados de referência. Essa referência, é subtraída do espectro da amostra pelo software para eliminar interferências externas, isolando as características específicas da amostra. Posteriormente, a lente foi reaberta e uma pequena quantidade (menos de 1 g) de amostra foi inserida no orifício, com o auxílio de uma espátula para leitura. A lente foi então novamente fechada, e a leitura da amostra foi realizada, fazendo com que o software obtivesse os comprimentos de onda e os convertesse pela transformada de Fourier em espectros, que são plotados em um gráfico para análise e identificação das moléculas presentes na amostra de casca de coco verde.

4.2.5. Teor de Extrativos, Ligninas, e Cadeias Carbônicas

A amostra de resíduo de casca de coco passou por extração com solventes acetona e água, e posteriormente foram submetidas à hidrólise ácida para liberar a lignina presente nas fibras da casca. Esse processo permitiu a determinação dos teores de extrativos e de ligninas solúveis, insolúveis e totais por meio de um espectrofotômetro UV-Vis e pelas cinzas residuais. Além disso, esse processo também possibilitou a identificação e quantificação de alguns ácidos orgânicos e cadeias carbônicas através da análise dos extrativos em uma coluna de monossacarídeos no HPLC.

Materiais utilizados:

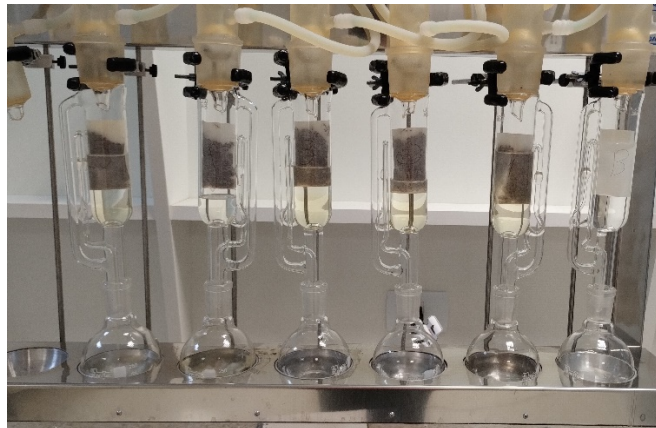
- Ácido sulfúrico 72% (m/m);
- Ácido sulfúrico 4% (m/m);
- Água destilada;
- Cadinho com placa sinterizada (Gooch) de porosidade de 16 μm ;
- Papel filtro;
- Tubo de hidrólise com tampa;
- Balança analítica;
- Autoclave;
- Estufa de secagem;
- Mufla;
- Shaker termostático;
- Kitassato;
- Bomba de vácuo;
- Espectrofotômetro de UV-Vis;
- Torre HPLC;
- Coluna Rezex RHM-Monossacarideo H+(8%);
- Bastão de vidro;
- Soxhlet;
- Extrator de gordura Soxhlet;
- Acetona PA;
- Balão de fundo redondo.

4.2.5.1. Extração e Determinação do Teor de Extrativos

A extração de compostos como gorduras, ceras, lipídios, aromáticos e impurezas que poderiam interferir nos resultados da análise das ligninas foi realizada em duas etapas, utilizando o método de extração Soxhlet com acetona e água como solventes. Inicialmente, amostras de biomassa e papéis de filtro foram colocados em uma estufa a 105°C por 1 hora. Após esse período, as amostras foram resfriadas em um dessecador e, em seguida, pesadas. Realizado este procedimento, nove papéis de filtro foram pesados em uma balança analítica, destes seis receberam amostras de aproximadamente 2 g de casca de coco, enquanto os outros três foram reservados para servir como controle (branco), sendo utilizados sem amostras no Soxhlet para estimar o percentual de perda de massa durante a extração.

Os papéis de filtro foram dobrados para formar cartuchos de amostras, os quais foram cuidadosamente colocados nos aparelhos Soxhlet com o auxílio de uma pinça e acoplados a balões de fundo redondo, conforme ilustrado na Figura 12. Na primeira extração, 50 mL de acetona foram adicionados aos balões. Em seguida, os conjuntos (Soxhlets e balões) foram montados no extrator de gordura e aquecidos a 150°C por 4 horas, contadas a partir do primeiro ciclo, momento em que uma quantidade significativa de solvente preencheu o sifão e retornou ao balão de fundo redondo. Após esse período, os cartuchos foram transferidos para uma estufa a 105°C por aproximadamente 12 horas e, posteriormente, resfriados em um dessecador. Para a segunda extração, os kits foram remontados, desta vez com a adição de 50 mL de água, e aquecidos a 250°C por 8 horas, contadas também a partir do primeiro ciclo de preenchimento do sifão do Soxhlet.

Figura 12 - Conjunto de Soxhlets e balões montados no extrator



Fonte: Autor

Após a conclusão das duas extrações, as amostras, ainda impregnadas com o solvente, foram novamente colocadas na estufa por aproximadamente 12 horas para que o solvente fosse completamente removido. Em seguida, as amostras foram resfriadas no dessecador, secas e pesadas. Com os dados obtidos, o balanço de massa foi realizado utilizando as Equações 5 e 6, permitindo determinar o teor de extrativos presentes na biomassa de coco.

$$\%F = \left(1 - \frac{m_{Ba} - m_{Bd}}{m_{Ba}}\right) * 100 \quad \text{Equação (5)}$$

$$\%E = \left(1 - \left(\frac{m_{pe} - (m_f * (1 - \%B))}{m_5}\right)\right) * 100 \quad \text{Equação (6)}$$

Onde,

- %F: teor de massa de perdido pelo papel filtro (%);
- m_{Ba} : massa do papel filtro usado como branco antes da extração, expressa em gramas (g);
- m_{Bd} : massa do papel filtro usado como branco após a extração, expressa em gramas (g);
- %E: teor de extrativos retirados da biomassa (%);
- m_{pe} : o papel filtro com a amostra após a extração, expressa em gramas (g).
- m_f : massa do papel filtro seco antes da pesagem da amostra, expressa em gramas (g);
- m_s : massa a amostra antes do procedimento de extração, expressa em gramas (g);

4.2.5.2. Hidrólise Ácida

A hidrólise ácida foi realizada em autoclave em banho termostático utilizando-se ácido sulfúrico a 72% (m/m). O processo começou com a inserção dos cartuchos contendo amostras de biomassa e papéis filtro, já livres de extrativos, em uma estufa a 40 ± 3 °C por 16 horas, para que fiquem livres de umidade. Após esse período, os cartuchos foram retirados, abertos, e as amostras de biomassa foram pesadas em uma balança analítica, utilizando em torno 0,3 g de biomassa por amostra em base seca. Os valores de massa foram devidamente registrados. Em seguida, as amostras foram transferidas para tubos resistentes à pressão, devidamente identificados.

Nos tubos contendo as amostras, adicionou-se 3,0 mL de ácido sulfúrico a 72% (m/m), com o auxílio de um bastão de vidro, assegurando a completa homogeneização da amostra com o ácido. Em seguida, os recipientes foram colocados em um misturador e imersos em um banho termostático a 30 ± 3 °C por 1 hora, com agitação da mistura a cada 10 minutos.

Após a conclusão da etapa de mistura, os recipientes foram retirados, e 84 mL de água destilada foram adicionados a cada um. Em seguida, os tubos foram fechados e levados a um equipamento de autoclave, como o ilustrado na Figura 13, onde foram aquecidos a 121 ± 3 °C, sob pressão de 120 psi, durante 1 hora. Após o período de aquecimento, os tubos foram retirados da autoclave e deixados para resfriar em seus

suportes, sobre a bancada do laboratório, até atingirem a temperatura ambiente, por aproximadamente 30 minutos.

Figura 13 –Vista frontal e diagonal de uma autoclave vertical de 300L



Fonte: Autor

4.2.5.3. Determinação de Ácidos Orgânicos e Cadeias Carbônicas

Enquanto a etapa de hidrólise era realizada, cadinhos de Gooch foram calcinados em uma mufla a 575 ± 25 °C por 4 horas, em seguida, eles foram resfriados em um dessecador para garantir a completa remoção de umidade. Após o resfriamento, os cadinhos foram utilizados para a filtração a vácuo da amostra de biomassa de coco hidrolisada. O filtrado foi coletado, e uma parte dele foi enviada para análise por Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC), conforme ilustrado na Figura 14, com o objetivo de identificar os ácidos orgânicos e as cadeias carbônicas presentes em solução.

Os ensaios no HPLC foram conduzidos por um analista de laboratório experiente, devido à sensibilidade do equipamento e ao elevado custo da análise, o que exigia precisão, cuidado e conhecimento técnico especializado para evitar erros, que pudessem comprometer os resultados. Para a análise, foi empregada uma coluna adequada à identificação de compostos orgânicos, conforme especificado na fotografia apresentada na Figura 15.

Figura 14 - Equipamento HPLC



Fonte: Autor

Figura 15 - Informações sobre a coluna usada no HPLC



Fonte: Autor

Neste ensaio busca-se encontrar os teores de carboidratos estruturais, como celulose, acetila, xilose, arabinose e hemiceluloses, para tal foi utilizado o HPLC com um detector de índice de refração (RI). As amostras hidrolisadas foram preparadas, filtradas e injetadas no equipamento, que separou os compostos presentes na solução ao passar a fase móvel através de uma coluna RHM-Monosaccharide H⁺ conforme as condições especificadas no Quadro 4. O cromatograma foi gerado a partir da detecção dos picos correspondentes aos compostos presentes na amostra, sendo o tempo de retenção e a área de cada pico utilizados para identificar e quantificar os componentes. A identificação dos produtos foi realizada com base no banco de dados e nas curvas analíticas padrões previamente configurados no software do equipamento. Ao final da

corrida o resultado dos teores dos compostos é lançado na tela do software gerando um arquivo podendo ser extraído em formato xls.

Quadro 4 - Condições do HPLC para determinação de carboidratos.

Equipamento	Marca	Modelo
HPLC	ThermoFisher Scientific	Ultimate 3000
Coluna	Pré-coluna	Marca
RHM-Monosaccharide H ⁺	Carbo-H	Phenomenex
Condições cromatográficas		
Fase móvel	H ₂ SO ₄ 0,005 M, filtrada em filtro 0,22 µm e desgaseificada	
Vazão de fase móvel	0,4 mL/min	
Volume de injeção	20 µL	
Temperatura da coluna	65 °C	
Detector	RI (refractive index)	
Tempo de corrida	35 min	

Fonte: Autor

4.2.5.4. Determinação do Teor de Ligninas

A porção restante do hidrolisado filtrado foi diluído na proporção de 1:9 com uma solução de ácido sulfúrico a 4% (m/m) para determinar a lignina solúvel, garantindo que as absorvâncias ficassem entre 0,2 e 1,0. O fator de diluição foi anotado. As amostras, bem como um branco contendo apenas o ácido sulfúrico a 4%, foram levados ao espectrofotômetro ilustrado na Figura 16, e analisadas por espectrofotometria UV-Vis nos comprimentos de 215 nm e 280 nm. Esses comprimentos de onda foram escolhidos por evidenciarem, respectivamente, a presença de ligações conjugadas nos anéis aromáticos da lignina e as transições que refletem a excitação de elétrons não ligantes em grupos funcionais substituintes, características das ligninas, conforme explicitado pela norma ABNT NBR 16550. O teor de ligninas foi determinado utilizando a Equação 7.

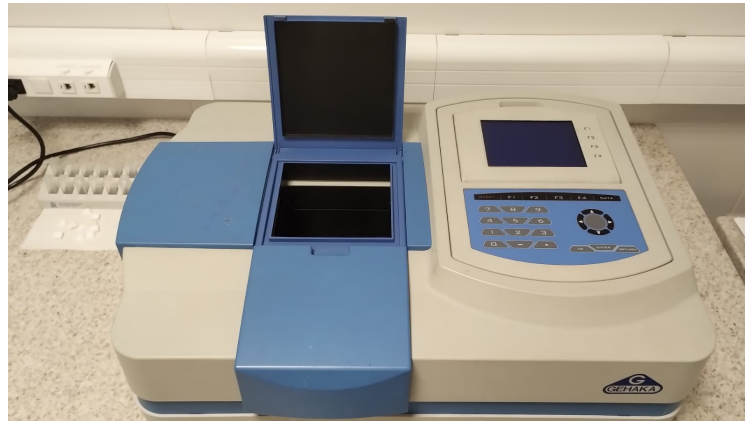
$$\%LigSol. = \frac{(4,53 * Abs_{215} - Abs_{280}) * V}{300 * Ms_{livext}} * fdligsol \quad \text{Equação (7)}$$

Em que:

- %LigSol: teor de lignina solúvel na biomassa, em base seca, expressa em porcentagem de massa (%m/m);
- Abs215: valor da absorvância a 215 nm analisado no UV-Vis.
- Abs280: valor da absorvância a 280 nm analisado no UV-Vis;

- V: volume do hidrolisado 0,08673 L;
- MS_{livext}: massa seca e livre de extrativos da biomassa, expressa em gramas (g);
- *fdligsol*: fator de diluição do processo.

Figura 16 - Espectrofotômetro Gehaka modelo VIS-340G UV-Visível



Fonte: Autor

Para encontrar o teor de lignina insolúvel, foi realizado um balanço de massa. O cadinho com o resíduo insolúvel foi colocado em uma estufa a $105 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ por 1 hora para remover toda a umidade da amostra. Em seguida, o cadinho foi transferido para um dessecador e deixado lá por aproximadamente 30 minutos, até atingir a temperatura ambiente. O cadinho contendo o resíduo insolúvel foi pesado em uma balança analítica, anotou-se a massa pesada e descontou-se a massa do cadinho seco.

Em seguida, o cadinho contendo o resíduo foi colocado em uma mufla a $575 \pm 25 \text{ }^\circ\text{C}$ por 4 horas. Após esse período, o cadinho foi transferido para o dessecador e mantido lá por aproximadamente 1 hora, até atingir a temperatura ambiente. O cadinho contendo o resíduo foi então pesado, em uma balança analítica. A massa obtida, descontando-se a massa do cadinho seco, é chamada de massa de cinzas do resíduo (M_{clig}) e é usada na equação 8

$$\%Ling\ Insol. = \frac{M_{rlig} - M_{clig}}{MS_{livext}} * 100\% \quad \text{Equação (8)}$$

Em que:

- %LigInsol: teor de lignina insolúvel na biomassa, em base seca, expressa em porcentagem de massa (%m/m);
- Mrlig: massa do resíduo com lignina e cinzas, expressa em gramas (g);
- Mclig: massa de cinzas do resíduo, expressa em gramas (g);
- MSlivext: massa seca e livre de extrativos da biomassa, expressa em gramas (g).

Por fim calculou-se o teor de ligninas totais conforme a Equação 9.

$$\%Lig\ Total. = (\%LigSol + \%LigInsol) * \frac{100 - \%Ext}{100} \quad \text{Equação (9)}$$

Em que:

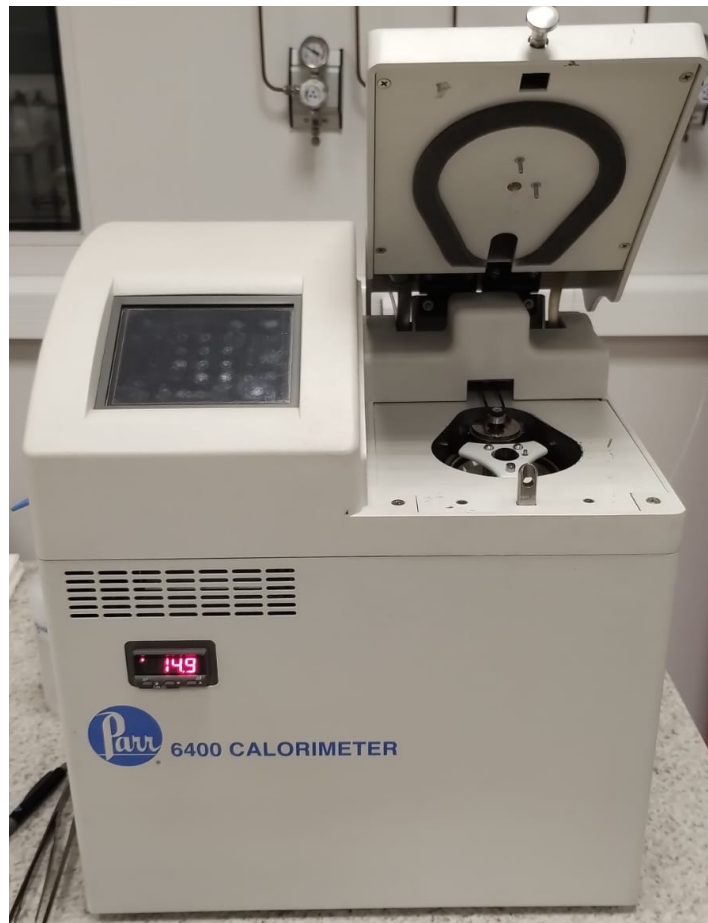
- %LigTotal: teor de ligninas totais na biomassa, em base seca, expressa em porcentagem de massa (%m/m);
- %LigSol: teor de lignina solúvel na biomassa, em base seca, expressa em porcentagem de massa (%m/m);
- %LigIns: teor de lignina insolúvel na biomassa, em base seca, expressa em porcentagem de massa (%m/m).

4.2.6. Poder Calorífico

Essa análise é fundamental para qualquer tipo de biomassa, visando-se investigar o seu potencial de geração de energia via queima.

As amostras de biomassa de casca de coco após serem secas e moídas foram levadas à bomba calorimétrica mostrada na Figura 17, para investigação do Poder Calorífico Superior (PCS).

Figura 17 - Bomba calorimétrica.



Fonte: Autor

Materiais empregados:

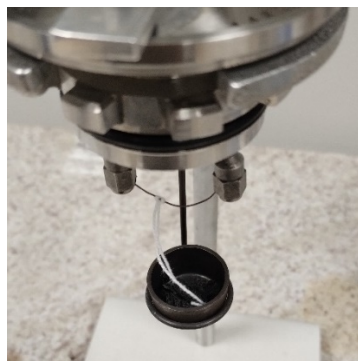
- Bomba calorimétrica
- Amostras de biomassa de coco;
- Balança analítica;
- Espátula;
- Óleo Mineral;
- Pinça;
- Pipeta de Pasteur;
- Fio de nylon;
- Cadinhos de cobre;

4.2.6.1 Determinação do PCS

Cinco cadinhos de cobre foram separados para a pesagem das amostras em uma balança analítica. Em cada cadinho de cobre, foi adicionada uma massa de aproximadamente 0,1 g de biomassa de coco. Após registrar os valores exatos, a balança foi novamente zerada, e agora 0,1 g de óleo mineral foi adicionado a cada cápsula, com o auxílio de uma pipeta de Pasteur. Novamente os valores exatos foram anotados.

As amostras, acondicionadas nos cadinhos de cobre, foram transferidas para a bomba calorimétrica. Com o auxílio de uma pinça, um fio de nylon foi cuidadosamente posicionado entre as amostras e o pavio, que foi inserido no interior da bomba, como ilustrado na Figura 18. Esse procedimento foi realizado para garantir que o equipamento pudesse iniciar a combustão das amostras de maneira eficiente, permitindo assim a medição da energia liberada durante o processo de combustão.

Figura 18 - Cadinho de cobre com amostra e pavio preparado para inserção na bomba calorimétrica



Fonte: Autor

Após o fechamento do equipamento, a massa das amostras e a quantidade de óleo mineral adicionada foram inseridas no painel do sistema da bomba calorimétrica. Com esses dados, o sistema do equipamento calculou o poder calorífico superior. O processo de combustão ocorre em uma atmosfera pressurizada a 80 psi de 99,5% de O_2 e é conduzido com um aumento controlado de temperatura, variando de 20 a 30°C, a uma taxa de aquecimento de 1°C por minuto, durante um período de 15 minutos. O resultado expresso em cal/g, foi exibido na tela do equipamento ao final da análise

Após a determinação do valor do PCS pode-se utilizar o valor da umidade obtido na equação 1, empregada na análise imediata, para calcular o poder calorífico

inferior (PCI) e o poder calorífico útil (PCU) empregando-se as equações 10 e 11, respectivamente, descritas a seguir:

$$PCI = PCS - 600 * \left(\frac{9 * H_{teorico}}{100} \right) \quad \text{Equação (10)}$$

$$PCU = PCI * \left(\frac{100 - Umidade}{100} \right) - 6 * Umidade \quad \text{Equação (11)}$$

Em que:

- PCS: poder calorífico superior;
- PCI: poder calorífico inferior;
- PCU: poder calorífico útil;
- Umidade: teor de umidade da amostra;
- H_{teórico}: teor de teórico hidrogênio da amostra.

4.2.7. Tratamento de Dados

Para o tratamento dos dados, foram utilizadas a média simples, o desvio padrão amostral e a porcentagem de desvio, conforme descritos nas Equações 12, 13 e 14. Esses dados serão discutidos e comparados com valores de outras bibliografias disponíveis, quando aplicável. Além disso, todo estudo com diversas amostras possui variabilidade e, para uma análise mais concisa, será utilizada a média, proporcionando uma forma mais objetiva de discutir os resultados.

Serão observados os resultados da porcentagem de desvio para assegurar que não haja um desvio padrão maior que 10% do valor da média, o que pode ser considerado relativamente alto e impactar a análise como um todo.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad \text{Equação (12)}$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad \text{Equação (13)}$$

$$\% \text{ desvio} = \frac{s}{\bar{x}} * 100\% \quad \text{Equação (14)}$$

Em que:

- \bar{x} : média de valores da amostra;
- s : desvio padrão amostral;

- *% desvio*: porcentagem de desvio padrão em relação a média amostral;
- *n*: número de amostras;
- x_i : valor individual da amostra *i*.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, os resultados serão apresentados em tabelas, que podem incluir diferentes números de amostras estudadas, devido a particularidades das análises como custo, disponibilidade de materiais e equipamentos, conforme descrito na parte experimental. Após a apresentação dos dados eles serão explorados e interpretados comparando-se com outras biomassas a fim de avaliar o potencial energético da casca de coco e suas implicações.

5.1. Umidade in Natura

Os resultados da Umidade in Natura da biomassa de coco verde são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Umidade in Natura da biomassa de casca de coco verde

<i>Amostra</i>	<i>Umidade in Natura</i>			
	Umidade in Natura %	Média %	Desvio padrão	% de desvio
1	88,97			
2	90,07			
3	90,54			
4	88,66	89,08	1,01	1,14%
5	88,05			
6	88,20			

Fonte: Autor

Os resultados indicam que a casca de coco verde, logo após o corte, contém uma quantidade significativa de água, com cerca de 90% de sua massa composta por umidade. Conforme o item “2.6 Potencial Calorífico”, um nível tão elevado de umidade reduz o poder calorífico do material, impactando negativamente sua eficiência como fonte de energia térmica. Assim, para o uso da casca de coco verde como biomassa, é essencial que ela seja adequadamente cortada e seca, a fim de otimizar sua combustão completa.

5.2. Análise Imediata

Os resultados da análise imediata que mostram os teores de umidade, o de voláteis, de cinzas e de carbono fixo nas amostras de biomassa de casca de coco

verde após sua secagem e moagem, obtidos por balanço de massa, são apresentados nas e mostrados pelas Tabelas 2, 3, 4 e 5.

Tabela 2 – Teor de umidade após secagem e moagem das amostras de biomassa de casca de coco verde.

<i>Teor de Umidade</i>				
<i>Amostra</i>	Teor de umidade perdida na estufa (%)	% média de umidade	Desvio padrão	% de desvio
1	4,11			
2	4,91			
3	3,80	4,01	0,54	13,45
4	3,66			
5	3,58			

Fonte: Autor

O resultado obtido no valor de 4%, é considerado uma quantidade baixa de umidade residual nas amostras após sua secagem e moagem. Assim mesmo retornando a temperatura ambiente, a biomassa retem pouca água. Esses resultados sugerem que a casca de coco moída apresenta potencial para queima eficiente, mesmo quando a biomassa for armazenada em ambiente natural por alguns dias, o que facilitaria o seu uso em processos de combustão com intervalos prolongados.

Tabela 3 – Teor de voláteis da biomassa de casca de coco verde.

<i>Teor de Voláteis</i>				
<i>Amostra</i>	Teor de voláteis perdido na mufla %	% média voláteis	Desvio padrão	% de desvio
1	68,81			
2	66,38			
3	68,15	68,16	1,03	1,52
4	68,76			
5	68,72			

Fonte: Autor

Em relação ao teor de voláteis das amostras, obteve-se um valor próximo a 68%, o que significa uma alta presença de substâncias orgânicas na biomassa. Este

teor elevado de voláteis sugere que a biomassa apresenta boa reatividade e rápida ignição, características que são essenciais para uma queima eficiente. Além disso, o alto teor de voláteis é favorável à combustão com baixa produção de resíduos, contribuindo para um processo mais limpo e com menor impacto ambiental.

Tabela 4 – Teor de cinzas da biomassa de casca coco verde

<i>Teor de Cinzas</i>				
<i>Amostra</i>	Teor de cinzas queimadas %	% média cinzas	Desvio padrão	% de desvio
1	22,98			
2	24,50			
3	23,75	23,61	0,57	2,43
4	23,32			
5	23,49			

Fonte: Autor

O teor de cinzas, que indica a presença de matéria inorgânica na amostra, foi estimado em cerca de 23%. Esse valor implica que aproximadamente um quarto da biomassa é composta por materiais que permanecem em combustão após a queima inicial. Esse resíduo inorgânico prolonga a queima, o que pode ser vantajoso para processos de combustão prolongada, pois auxilia na manutenção da temperatura e facilita a queima de material adicional.

Tabela 5 – Teor de carbono fixo da biomassa de casca coco verde

<i>Teor de Carbono Fixo</i>				
<i>Amostra</i>	Teor de carbono fixo %	Média % carbono residual	Desvio padrão	% de desvio
1	4,11			
2	4,22			
3	4,30	4,22	0,07	1,69
4	4,26			
5	4,21			

Fonte: Autor

Por fim, o teor de carbono fixo na biomassa foi de cerca de 4%, indicando que, após a queima completa, restará uma quantidade mínima de resíduo sólido. Esse baixo teor residual demonstra que quase toda a biomassa é convertida em energia térmica, um aspecto positivo para a eficiência do processo de combustão e para a manutenção da caldeira de biomassa. Em processos de grande escala, essa característica facilita a limpeza e reduz a necessidade de manutenção frequente, além de contribuir para uma queima mais sustentável e eficiente.

5.3. Resultados Análise Elementar

Os teores de nitrogênio (N), carbono (C), hidrogênio (H) e, enxofre (S) da biomassa de casca de coco verde são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Análise Elementar (CHNS-O) da biomassa de casca de coco verde

Análise Elementar

<i>Amostra</i>	Teor de Nitrogênio %	Teor de Carbono %	Teor de Hidrogênio %	Teor de Enxofre %
<i>1</i>	0,57	45,84	5,44	0,00
<i>2</i>	0,53	46,76	5,67	0,00
<i>Média</i>	0,55	46,30	5,56	0,00
<i>Desvio padrão.</i>	0,03	0,65	0,16	0,00
<i>% de desvio</i>	4,68	1,40	2,94	0,00

Fonte: Autor

A análise elementar da biomassa visou determinar as quantidades de elementos químicos presentes e, e com base nos resultados dessa análise, avaliar potenciais riscos durante a combustão. Em particular, a presença de elementos gera compostos corrosivos e difíceis de tratar, como o enxofre (S), foi investigado. O resultado nulo para o enxofre é favorável, pois indica a ausência de risco de formação de compostos sulfurosos, que são conhecidos por serem corrosivos e por aumentarem a complexidade do tratamento de emissões.

O teor de carbono (C) representou aproximadamente 46% da amostra, e evidenciando uma alta quantidade de material orgânico, o que é comum em biomassas, e se relaciona com o teor de voláteis diretamente relacionados ao comportamento térmico e energético da biomassa. Enquanto o carbono é o principal responsável pela liberação de energia durante a combustão, o alto teor de voláteis

mostra uma boa presença de compostos orgânicos que se decompõem com facilidade em gases inflamáveis, favorecendo uma ignição rápida e eficiente. Todos estes pontos sugerem que a biomassa possui um bom potencial energético, com uma combustão inicial reativa e rápida, graças aos voláteis, seguida por uma queima mais prolongada e estável proporcionada pelas cinzas e o carbono fixo.

O hidrogênio (H), com um teor de aproximadamente 5%, é normalmente encontrado em biomassa na forma de água, ao lado do oxigênio (O). Durante a combustão, o hidrogênio na forma de água evapora rapidamente, enquanto o restante se encontra em moléculas orgânicas e inorgânicas que são queimadas a temperaturas mais elevadas. Esse teor de hidrogênio, associado ao carbono, contribui para uma combustão eficiente.

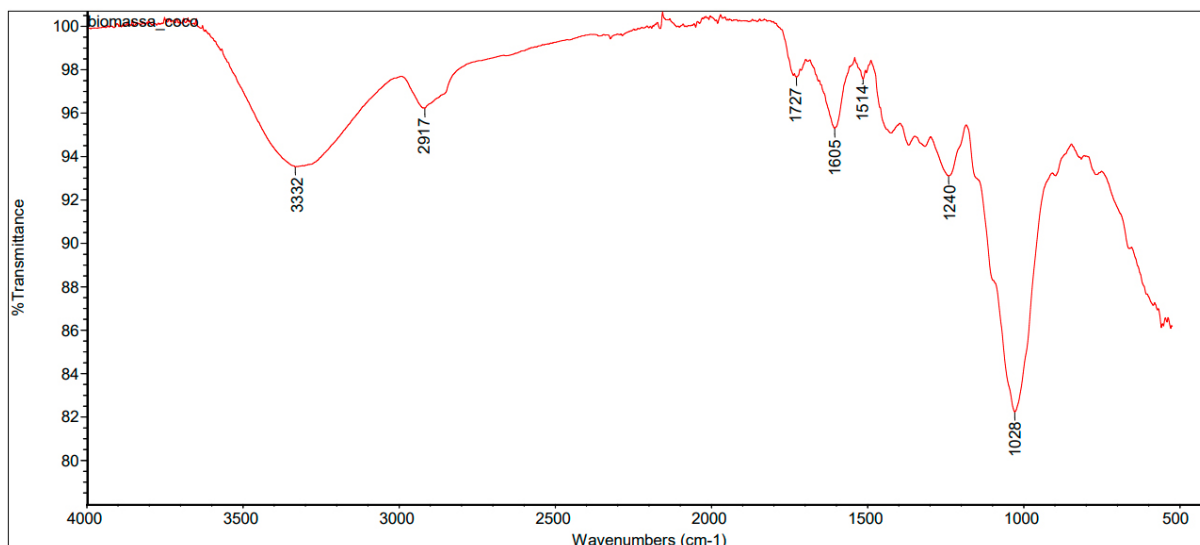
O nitrogênio (N), é essencial para o crescimento vegetal e, portanto, comumente encontrado em biomassas. Por outro lado, sua presença pode chamar atenção, pois sua combustão produz gases poluentes e exigir temperaturas de ignição mais altas, dificultando o processo de queima. As amostras estudadas no presente trabalho apresentam um teor de nitrogênio de aproximadamente 0,55% minimizando esses riscos e indicando que a produção de compostos nitrogenados prejudiciais será pouco significativa e que a combustão não deverá demandar temperaturas excessivamente elevadas.

Esses resultados sugerem que a biomassa de casca de coco verde possui um perfil seguro e eficiente para a combustão. A ausência de enxofre e o baixo teor de nitrogênio indicam um potencial de queima com baixo impacto ambiental, enquanto o teor elevado de carbono e hidrogênio reforçam possibilidade de aproveitamento energético desta biomassa.

5.4. Análise FTIR

O resultado da análise da biomassa de casca de coco verde por Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) é mostrado na Figura 19, e as atribuições dos picos no Quadro 5. Essa análise fornece informações sobre grupos funcionais e tipos de ligações químicas presentes na amostra. Para atribuição dos picos do espectro FTIR foi necessário comparar o resultado do presente trabalho com alguns padrões de biomassa semelhantes disponíveis na bibliografia como (Fan, Dai, & Huang, 2012) e (Bakti; Gareso, 2018).

Figura 19 – Espectro de FTIR da biomassa de casca de coco verde



Fonte: Autor

Quadro 5 - Atribuições espectrais de infravermelho (IR) com base nos números de onda.

Pico (cm ⁻¹)	Atribuição espectral	Referência
3332	Estiramento O-H (ligação de hidrogênio intermolecular)	3500-3300 cm ⁻¹ (Fan, Dai, & Huang, 2012)
2917	Estiramento assimétrico C-H	2930-2900 cm ⁻¹ (Fan, Dai, & Huang, 2012)
1727	Estiramento C=O em ésteres	1710-1740 cm ⁻¹ (Fan, Dai, & Huang, 2012)
1605	Estiramento esquelético C=C aromático	1625-1610 cm ⁻¹ (Fan, Dai, & Huang, 2012)
1514	Banda de estiramento C=C em sistemas aromáticos	1510-1570 cm ⁻¹ (Fan, Dai, & Huang, 2012)
1240	Estiramento assimétrico C-O em ésteres e fenóis	1284-1240 cm ⁻¹ (Fan, Dai, & Huang, 2012)
1028	Estiramento C-O em álcoois, fenóis e ácidos carboxílicos e ligação P=O em ésteres de fosfato	1260-1000 cm ⁻¹ (Fan, Dai, & Huang, 2012) (Bakti e Gareso, 2018)

Fonte: Adaptado de Fan, Dai, & Huang, 2012. (tradução do autor).

O espectro de FTIR (Figura 19) exibe sete picos principais, associados a diferentes grupos químicos orgânicos presentes na amostra. Esse conjunto de picos

mostra a complexidade da composição da biomassa como mostrado no Quadro 5 e ajuda a identificar substâncias presentes, que influenciam seu comportamento durante a combustão.

O primeiro pico, observado em 3332 cm^{-1} , é característico de estiramento dos grupos hidroxila (OH), comuns em álcoois e fenóis, e segundo Fan, Dai, & Huang, (2012) esses grupos são encontrados em componentes estruturais como celulose, hemicelulose e lignina. Esse pico também pode indicar a presença de água residual na amostra, já que grupos hidroxila são típicos de compostos com alta afinidade por umidade.

A banda centrada em 2917 cm^{-1} , é relativamente menos intensa, e está associada à um estiramento assimétrico, e indicando a presença de ligações (C-H). De acordo com Fan, Dai, & Huang, (2012) esse estiramento é típico de grupos metila e metileno, que compõem cadeias longas, como as de ácidos graxos e lignina. A presença desses grupos sugere a ocorrência de compostos com cadeias carbônicas longas, o que é favorável para a queima da biomassa.

Em 1727 cm^{-1} , há um pico que aponta para a presença de ligações C=O representado principalmente por ésteres, esse tipo de estiramento é característico das carbonilas. Em uma biomassa, a presença de ésteres é considerada favorável, pois segundo Henrard (2024) esses compostos são associados a lipídios e outros componentes orgânicos, que são consumidos na queima em temperaturas médias acima de 120°C , o que potencializa seu uso como biomassa.

Os picos próximos 1605 cm^{-1} e 1514 cm^{-1} apontam para a presença de vários grupos funcionais aromáticos, ambos com ligações C=C, mas com pequenas e sutis diferenças. Em 1514 cm^{-1} temos uma banda de dobramento e possível estiramento conforme Fan, Dai, & Huang (2012). Já no pico 1605 cm^{-1} , temos um estiramento esquelético característico dos ácidos carboxílicos. Esses grupos são indicativos de compostos estruturais complexos, como os encontrados na lignina.

Os picos em 1240 cm^{-1} e 1028 cm^{-1} observados correspondem a vibrações de estiramento de ligações C-O. O pico de 1240 cm^{-1} , segundo Fan, Dai e Huang (2012), refere-se ao estiramento assimétrico dessas ligações, e pode incluir grupos funcionais como éteres aromáticos, ésteres e fenóis. Já o pico de 1028 cm^{-1} representa o estiramento não assimétrico das ligações C-O, englobando grupos como ácidos

carboxílicos, álcoois, fenóis e ésteres. Essas ligações são típicas de estruturas de lignina e polissacarídeos, como a celulose, corroborando a presença de longas cadeias de carboidratos na biomassa analisada.

Além disso, Bakti e Gareso (2018) ressaltam que a faixa de 1028 cm^{-1} também pode corresponder a ligações P=O em ésteres de fosfato, eles podem estar associados a processos biológicos, como reações bioquímicas que aceleram a decomposição da biomassa. Isso pode representar um problema no armazenamento por um longo período da casca de coco verde, devido à possibilidade de degradação.

Esses resultados mostram que a biomassa analisada, é composta por ligações envolvendo hidrogênio e oxigênio em longas cadeias carbônicas, e ésteres de fosfato. A presença de grupos funcionais que são de fácil combustão a temperaturas médias (120 a 300°C) como mostrado no estudo do teor de voláteis e reforça o seu uso como biomassa para aplicações de queima, especialmente como combustível derivado da casca de coco.

5.5. Análise de Extrativos

Os resultados das análises do teor de extrativos da biomassa de casca de coco verde são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados de Teor de Extrativos

<i>Teor de Extrativos</i>				
<i>Amostra</i>	Teor de extrativos %	Média	Desvio Pad.	% de desvio
1	27,81			
2	28,38			
3	28,51	28,51	0,68	2,37
4	28,86			
5	29,63			
6	27,87			

Fonte: Autor

O teor de extrativos, foi de cerca de 28,51%. Este resultado está dentro do que normalmente é observado em biomassas agrícolas, como a casca do coco, que, de acordo com Carvalho *et al.* (2021), costuma variar entre 20% e 35%. E Gonçalvez (2016) também fez um estudo sobre o teor de extrativos da casca de coco verde obtendo resultado de 33,68%, levemente superior ao resultado obtido o que

segundo o próprio autor pode ser causado devido a variabilidade genética da espécie estudada, do solo onde se desenvolveu, das condições de crescimento e da maturidade do coco no momento do corte.

Além disso outros fatores individuais da amostra estudada devem ser considerados ao fazer a comparação, a amostra de coco verde foi recolhida na área de descarte de um do quiosque da cidade de Três Lagoas, elas podem ter sido contaminadas por outros rejeitos, que poderiam ser removidos durante a extração, alterando o resultado da análise de extrativos.

Em termos gerais, o processo de remoção dos extrativos busca retirar as impurezas da biomassa, o que beneficia as análises posteriores garantindo a eliminação de substâncias indesejáveis que podem interferir nos resultados. A quantidade de extrativos pode significar a remoção de muitas substâncias, segundo PEGO *et al.*, (2019) isso pode incluir compostos diversos como gorduras, ceras e proteínas.

5.6. Análise HPLC

A análise cromatográfica por HPLC foi realizada para identificar e quantificar os principais componentes estruturais da biomassa, incluindo celulose, hemicelulose e seus derivados, como xilose e arabinose. Esses dados são fundamentais para avaliar o potencial de aproveitamento da casca de coco em aplicações industriais, considerando sua composição química. A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos, fornecendo uma base para discutir a viabilidade da biomassa em diferentes contextos.

Tabela 8 – Resultados HPLC da biomassa de coco verde

<i>Amostra</i>	<i>Celulose</i> (%)	<i>Acetilas</i> (%)	<i>Xilose</i> (%)	<i>Arabinose</i> (%)	<i>Hemicelulose</i> (%)
1	20,87	1,50	8,16	1,38	11,03
2	20,30	1,37	7,30	1,23	9,91
3	20,72	1,48	7,85	1,71	11,05
4	19,95	1,37	7,39	1,46	10,23
5	20,62	1,19	7,41	1,41	10,01
<i>% Média</i>	20,49	1,38	7,62	1,44	10,44
<i>Desvio padrão %</i>	0,37	0,12	0,37	0,17	0,56

% de desvio		1,79	8,86	4,82	12,15	5,33
-------------	--	------	------	------	-------	------

Fonte: Autor

A análise realizada por HPLC mostrou que a biomassa apresenta um teor elevado de celulose, enquanto os demais componentes, como xilose, arabinose e grupos acetilados, aparecem em quantidades bem menores. Apesar disso, os dados apresentaram grande variação, especialmente na determinação da arabinose e das acetilas, onde o desvio padrão em relação à média foi bastante elevado. Essa variação pode estar relacionada à baixa concentração desses componentes na amostra, o que faz com que pequenas oscilações nos valores influenciem de forma significativa os resultados.

Em média o teor de celulose foi de cerca de 20%, considerado um teor relativamente baixo quando comparado a outras biomassas amplamente utilizadas na indústria, como o bagaço de cana-de-açúcar (25–45%) e o eucalipto (54%), conforme dados de Isikgor e Becer (2015). Essa concentração de celulose torna a casca de coco uma opção menos viável para a produção de papel e celulose. No entanto, a celulose possui características favoráveis à combustão instantânea, sendo relevante no contexto energético. É importante destacar, entretanto que um teor muito elevado de celulose poderia resultar em uma queima rápida e ineficiente. O teor de celulose evidenciado no presente trabalho sugere um potencial moderado para o aproveitamento energético da casca do coco verde.

O teor médio de hemicelulose, composta por acetilas, xilose, arabinose e outros polissacarídeos ramificados, de 10%, valor tecnicamente inferior ao de outras biomassas, segundo Rivas-Cantu, Jones e Mills (2013) esse teor é semelhante ao de bagaço de laranja, que raramente é utilizado para fins energéticos.

De forma geral, os baixos teores dos principais compostos da casca de coco verde tornam inviável a busca por alternativas de uso distintas do aproveitamento energético. O custo elevado para a extração de matérias-primas específicas, como celulose e hemicelulose, não é justificável frente à baixa concentração encontrada. Assim, conclui-se que a biomassa pode ser direcionada à queima, sem comprometer o aproveitamento de outras potenciais matérias-primas e com impacto químico mínimo no desempenho energético.

5.7. Análise de Ligninas

Após a remoção das impurezas durante a extração e a hidrólise, que facilita a quantificação das ligninas, foi possível investigar as ligninas solúveis, por meio da absorvância no UV-VIS, as ligninas insolúveis que foram quantificadas a partir do resíduo nos cadinhos de Gocht. Com isso, também foi possível determinar o teor total de ligninas (lignina solúvel + lignina insolúvel) nas amostras, conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 - Teor de ligninas na biomassa de casca de coco verde

<i>Teor de Ligninas</i>			
<i>Amostra</i>	Lignina Insolúvel (%)	Lignina Solúvel (%)	Lignina Total (%)
1	17,70	0,56	18,26
2	18,36	0,62	18,98
3	18,67	0,57	19,24
4	18,61	0,66	19,27
5	17,36	0,59	17,95
6	16,42	0,61	17,03
<i>Média</i>	17,85	0,60	18,46
<i>Desvio padrão</i>	0,87	0,04	0,88
<i>% de desvio</i>	4,89	6,14	4,77

Fonte: Autor

Observa-se um teor de ligninas totais de aproximadamente 18%, um valor baixo em comparação a outras biomassas, como o bagaço de cana-de-açúcar, que apresenta valores que variam de 18 a 25%, segundo Marabezi (2014). É importante destacar que as ligninas desempenham um papel fundamental ao conferir dureza, densidade e resistência ao material, como é o caso da lenha ou dos cavacos de eucalipto, que podem conter até 30% de lignina, conforme citado por Gomide (2005).

Embora o teor de lignina do bagaço de coco verde seja relativamente menor do que o de outras biomassas, este material é mais duro nas regiões externas, próximas à casca. No entanto, à medida que se aproxima do endocarpo no centro, a umidade aumenta, resultando em uma redução na dureza do coco. Considerando-se que a concentração de lignina na casca do coco pode ser relativamente maior do que no

endocarpo isso poderia tornar mais difícil a produção de etanol a partir da casca de coco verde, já que nos processos de pré-tratamento e hidrólise da biomassa, a lignina pode gerar compostos que inibem a fermentação de açúcares. Por esta razão, em processos de geração de etanol celulósico a partir da cana-de-açúcar, teores de lignina abaixo de 20% são considerados algo muito positivo. Por outro lado, na queima, que é o alvo deste estudo, a lignina desempenha um papel importante, facilitando a combustão e contribuindo de maneira significativa para a geração de energia térmica.

5.8. Análise do Poder Calorífico

O poder calorífico é dividido em Poder Calorífico Superior (PCS), que considera a energia total liberada na combustão completa, Poder Calorífico Inferior (PCI), que desconta a energia perdida na forma de vapor d'água, e Poder Calorífico Útil (PCU), que reflete o aproveitamento prático dessa energia. Esses valores são fundamentais para comparar a eficiência da biomassa analisada com outras fontes energéticas utilizadas em caldeiras industriais e agrícolas. A seguir, a Tabela 10 apresenta os resultados obtidos para a casca de coco verde.

Tabela 10 – Poder Calorífico PCS, PCI e PCU da casca de coco verde

<i>Poder Calorífico</i>			
<i>Amostra</i>	<i>PCS (cal/g)</i>	<i>PCI (cal/g)</i>	<i>PCU (cal/g)</i>
1	4.241,40	3.941,59	3.939,77
2	4.212,32	3.912,51	3.910,70
3	4.248,20	3.948,39	3.946,57
4	4.201,47	3.901,66	3.899,86
5	4.344,74	4.044,93	4.043,07
<i>Média</i>	4.249,63	3.949,82	3.947,99
<i>Desvio padrão</i>	56,63	56,63	56,61
<i>% de desvio</i>	1,33%	1,43%	1,43%

Fonte: Autor

Os resultados apresentados na Tabela 10 mostram que a biomassa analisada, oriunda da casca de coco verde, possui um Poder Calorífico Superior (PCS) médio de 4.249,63 cal/g, Poder Calorífico Inferior (PCI) médio de 3.949,82 cal/g e Poder Calorífico Útil (PCU) médio de 3.947,99 cal/g.

O PCS da casca de coco verde é próximo do PCS do resíduo de cavaco de eucalipto que é de aproximadamente 4.241,9 cal/g (Costa, 2019). O cavaco de eucalipto é comumente utilizado na indústria de papel e celulose como fonte de energia. Portanto, a similaridade e seus valores de PCS indicam a possibilidade do uso da casca de coco verde como fonte alternativa de energia, em aplicações similares as do resíduo de cavaco de eucalipto.

Outra comparação relevante envolve o bagaço de cana, amplamente utilizado em usinas no Brasil, com PCS de cerca de 4.030 cal/g (Girão, 2016). Levando-se em conta que, assim como a casca de coco verde investigada no presente trabalho, o bagaço de cana também foi pré-tratado, visando-se a redução da umidade antes da queima, o PCS da casca de coco supera o valor médio encontrado para o bagaço, reforçando assim o seu potencial para aplicações energéticas.

Em resumo, os valores evidenciados para a casca de coco verde situam-se dentro do intervalo esperado para biomassas agrícolas utilizadas como combustível, posicionando-a como uma alternativa viável e eficiente para uso energético. Esses resultados destacam o potencial da casca de coco verde como matéria-prima para caldeiras de biomassa, contribuindo para o aproveitamento de resíduos urbanos e para a diversificação de fontes de energias renováveis.

6. CONCLUSÃO E PERSPECIVAS

No presente estudo investigou-se a composição química do bagaço de coco verde, com foco na avaliação de seu potencial como fonte de energia sustentável, conforme os parâmetros estabelecidos pelas normas brasileiras. A caracterização química realizada permitiu a identificação de componentes-chave, como os teores de umidade, lignina, carbono e nitrogênio, os quais demonstraram que o bagaço de coco verde possui um potencial energético significativo. Seus níveis de poder calorífico são comparáveis aos de outras biomassas tradicionais, como o cavaco de eucalipto e o bagaço de cana-de-açúcar, o que o torna uma alternativa viável para a produção de energia. Além disso, a ausência de enxofre em sua composição reduz o risco de emissões de substâncias sulfurosas durante a queima, destacando-se como mais uma opção mais limpa de biomassa.

Por outro lado, o bagaço de coco verde não se mostra tão adequado uso em outras vertentes como para a extração de celulose, devido ao seu baixo teor comparado ao eucalipto, o que limita suas aplicações em outros setores industriais. Em relação às implicações ambientais e econômicas, o uso do bagaço de coco verde como fonte de energia apresenta vantagens significativas, especialmente em termos de sustentabilidade, ao reduzir a dependência de fontes fósseis e minimizar os impactos ambientais associados. Quando comparado a outras fontes de energia convencionais, como o bagaço de cana-de-açúcar, a casca de coco mostra-se uma alternativa energeticamente eficiente e que minimiza a poluição, o que reforça sua viabilidade como componente de uma matriz energética mais limpa.

Apesar dos resultados promissores obtidos no presente trabalho e do potencial da casca de coco verde para fins de geração de energia, a viabilização do seu emprego envolve também a gestão dos resíduos da casca de coco verde em um país de dimensões continentais, como o Brasil, com uma grande extensão de praias e, conseqüentemente, um volume considerável de resíduos. A responsabilidade pela gestão desses resíduos recai, muitas vezes, sobre os municípios, o que gera dificuldades logísticas e financeiras. Para superar essas barreiras, estratégias como a implementação de legislações federais específicas, investimentos em caldeiras de biomassa e a integração de diferentes tipos de biomassa ao sistema nacional de energia são essenciais. Além disso, parcerias público-privadas e iniciativas privadas,

desde que sustentadas por modelos de negócio rentáveis, podem contribuir para a viabilização do uso do bagaço de coco verde na geração de energia renovável.

Em suma, o bagaço de coco verde se configura como uma alternativa interessante para a diversificação da matriz energética brasileira, desde que haja um esforço coordenado entre os setores público e privado para superar os desafios logísticos e promover investimentos em infraestrutura e tecnologias de conversão de biomassa.

7. BIBLIOGRAFIA

ANUÁRIO BRASILEIRO DAS INDÚSTRIAS DE BIOMASSA E ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Uso Energético da Biomassa e Briquetes de Casca de Coco**, p. 42-44, 2012/2013. Disponível em: https://issuu.com/anuariobiomassa/docs/anuario_biomassa_e_energias_renovaveis_2012. Acesso em: 08 jun. 2024.

ARAÚJO, G.S. **Produção de Biodiesel a partir de óleo de coco**. 2008. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 16550:2018 – **Caracterização Química**. Rio de Janeiro, 2018.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 8633:1984 – **Determinação de Poder Calorífico**. Rio de Janeiro, 1984.

AZAMBUJA, W. **Óleo de Coco e o Ácido Láurico: Óleos essenciais direto do produtor**. Disponível em: <http://www.oleosessenciais.org/oleos-de-coco-e-o-acido-laurico/>. Acesso em: 15 jun. 2024.

BAKTI, Andi Ikhtiar; GARESO, Paulus Lobo. Characterization of active carbon prepared from coconut shells using FTIR, XRD and SEM techniques. **Jurnal Ilmiah Pendidikan Fisika Al-BiRuNi**, v. 7, n. 1, p. 33-39, 2018. DOI: 10.24042/jipfalbiruni.v7i1.2459. Disponível em: <https://jipfalbiruni.uinradenintan.ac.id>. Acesso em: 24 dez. 2024.

BEDIA, J.; PEÑAS-GARZÓN, M.; GÓMEZ-AVILÉS, A.; RODRIGUEZ, J. J.; BELVER, C. **A review on the synthesis and characterization of biomass-derived carbons for adsorption of emerging contaminants from water**. C, v. 4, n. 4, p. 63, 2018.

BONTEMPO, M. **O poder medicinal do coco e do óleo de coco extravirgem**. 1. ed. São Paulo: Alaúde Editorial, 2008.

BRAINER, Maria Simone de Castro Pereira. Coco: produção e mercado. **Caderno Setorial ETENE**, Fortaleza, v. 6, n. 206, p. 1-4, dez. 2021.

BRASIL. Lei Federal nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 3

ago. 2010. Disponível em: <https://www.jusbrasil.com.br/legislacao/859156/lei-12305-10>. Acesso em: 12 set. 2024..

CARVALHO, N. R.; BARROS, J. L.; SILVA, D. A.; NAKASHIMA, G. T.; YAMAJI, F. M. Physical and chemical characterization of biomass used as solid fuel in a boiler. **Química Nova**, v. 44, n. 1, p. 35-40, 2021. DOI: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170663>.

CNN BRASIL. Número de dias com ondas de calor aumentou 642% em 60 anos no Brasil, diz estudo. **CNN Brasil**, 2024. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/numero-de-dias-com-ondas-de-calor-aumentou-642-em-60-anos-no-brasil-diz-estudo/>. Acesso em: 19 fev. 2024.

COSTA, Ana Carolina Lopes Amaral. **Caracterização físico-química da biomassa de tocos e raízes de clones de eucalipto para fins energéticos**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2019.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Aproveitamento de cascas de coco para geração de energia térmica: potencialidades e desafios. Anderson Carlos Marafon, Maria Urbana Corrêa Nunes, André Felipe Câmara Amaral, Jonas Paulino dos Santos. Documentos 234. **Embrapa Tabuleiros Costeiros**, Aracaju, 2019. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/210127/1/DOC-234.pdf>. Acesso em: 19 fev. 2024.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Casca de coco**. Maria Urbana Corrêa Nunes. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/coco/pos-producao/coprodutos#:~:text=Casca%20de%20coco.,de%20p%C3%B3s%20processo%20industrial>. Acesso em: 19 fev. 2024.

EPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Atmospheric Concentrations of Greenhouse Gases**, 2015. Disponível em: <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-atmospheric-concentrations-greenhouse-gases>. Acesso em: 19 fev. 2024.

FAN, M.; DAI, D.; HUANG, B. **Fourier Transform Infrared Spectroscopy for Natural Fibers**. 2012. Disponível em: <www.intechopen.com>. Acesso em: 24 dez. 2024.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. *FAOSTAT: Data on production, trade, and consumption*. 2025. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>. Acesso em: 21 fev. 2025.

FERRAZ, J. M. **Produção e propriedades de painéis de fibra de coco verde (Coco nucifera L.) em mistura com cimento Portland**. Dissertação de mestrado em Ciências Florestais. Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

G1. Fibra do coco pode virar remédio. **G1**, 2016. Disponível em: <https://g1.globo.com/como-sera/noticia/2016/03/fibra-do-coco-pode-virar-remedio.html>. Acesso em: 12 de setembro de 2024

GIRÃO, Luiz Eduardo Barbosa. **Bagaço de cana-de-açúcar: investigação do poder calorífico e potencial energético**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Energias Renováveis) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

GOMIDE, J.L.; COLODETTE, J.L.; OLIVEIRA, R.C.; SILVA, C.M. Caracterização tecnológica para produção de celulose, da nova geração de clone de Eucalyptus do Brasil. **Revista Árvore**. Viçosa, v.29, n.1, p.129-137, 2005.

GONÇALEZ, J. C. Aproveitamento da casca do coco-verde (Cocos nucifera L.) para produção de polpa celulósica. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 1, p. 321–330, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509821126>.

GONÇALVES, F. A.; RUIZ, H. A.; DOS SANTOS, E. S.; TEIXEIRA, J. A.; MACEDO, G. R. Hidrólise Enzimática, sacarificação e fermentação simultânea de materiais lignocelulósicos usando *Saccharomyces cerevisiae* CA11. **XIX Simpósio Nacional de Bioprocessos**, Foz do Iguaçu, 2013.

HENRARD, Adriano Seizi Arruda. **Produção e purificação de biogás utilizando microalga *Spirulina* sp. LEB-18**. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos) – Universidade Federal do Rio Grande, Escola de Química e Alimentos, Rio Grande, 2024. Orientador: Jorge Alberto Vieira Costa. Coorientadora: Michele da R. A. Z. de Souza.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Coco-da-baía**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/coco-da-baia/br>. Acesso em: 19 fev. 2024.

ISIKGOR, H. FURKAN; BECER, C. R. **Lignocellulosic biomass: A sustainable platform for production of bio-based chemicals and polymers**. *Polymer Chemistry*, p. 2–61, 2015.

LEITÃO, R. C.; ARAÚJO, A. M.; FREITAS-NETO, M. A.; ROSA, M. F.; SANTAELLA, S. T. **Anaerobic treatment of coconut husk liquor for biogás production**. *Water Science and Technology*, Fortaleza, 2009.

LOPES, Wilson Araújo; Fascio, Miguel. **Esquema para interpretação de espectros de substâncias orgânicas na região do infravermelho**. *Química Nova*, v. 27, n. 4, p. 670-673, 2004. Recebido em: 25 jul. 2003; aceito em: 27 nov. 2003; publicado na web em: 27 mai. 2004.

MACHADO, Leandro Junior *et al.* **Utilização da biomassa do coco verde (Cocos nucifera L.) para obtenção de subprodutos**. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v. 6, n. 1, p. 3808-3826, jan. 2020.

MARABEZI, Karen. **Deslignificação de bagaço de cana-de-açúcar: reações, isolamento e utilização de ligninas**. 2014. Tese (Doutorado em Físico-Química) - Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. doi:10.11606/T.75.2014.tde-02022015-112400. Acesso em: 2024-01-03.

MARTINS, Adriana Pacheco *et al.* **O Problema do Pós-consumo do Coco no Brasil: Alternativas e Sustentabilidade**. *Sustentabilidade em Debate*, Brasília, v. 7, n. 1, p. 44-57, jan./abr. 2016. DOI: 10.18472/SustDeb.v7n1.2016.16566.

MONTEIRO, Mikaella Meira; NETO, Pedro Nicó de Medeiros; MARTINS, Kyegla Beatriz da Silva; MELO, Joanna Letícia Diniz; MEDEIROS, Natielly Cristine Gomes de; SOUZA JUNIOR, Carlos Magno Pereira de. **Determinação do poder calorífico do carvão vegetal comercializado no centro da cidade de Patos-PB**. *Agropecuária Científica no Semiárido*, Patos, v. 15, n. 3, p. 176-178, Edição Especial VI CONEFLO, 2019.

MONTEIRO, R. A. **Avaliação do Potencial de adsorção de U, Th, Pb, Zn e Ni pelas fibras de coco.** Dissertação de mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2009.

NEVES, Rafael Dantas; REIS, José Newton Pires; CRUZ, Marcos Paulo Mesquita da; CRUZ, Caroline Mesquita da. Análise da comercialização do coco-verde no estado do Ceará nos anos de 2013 a 2019. **Revista de Economia e Agronegócio - REA**, v. 20, n. 1, 2022.

OLIVEIRA, Jéssica Christine Gonçalves de. **Processos de valorização dos resíduos do coco.** 2017. 68 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

PEGO, Matheus Felipe Freire; BIANCHI, Maria Lúcia; VEIGA, Tais Regina Lima Abreu; ARAÚJO, Ana Clara Caxito de; SÁNCHEZ, José Yony Cricel Sima. **Identificação de compostos extraíveis da madeira pela cromatografia gasosa e espectroscopia de massas.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA – CBCTEM, 4., 2019, Lavras. Anais [...]. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2019.

PESSOTTI, Kaio Pandolfi. **Estudo da Viabilidade Técnica do Aproveitamento Energético da Casca de Coco.** 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Instituto Federal do Espírito Santo, Campus São Mateus, São Mateus, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ifes.edu.br/bitstream/handle/123456789/1031/Estudo%20da%20viabilidade%20t%C3%A9cnica%20do%20aproveitamento%20energ%C3%A9tico%20da.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 19 fev. 2024.

RIVAS-CANTU, R. C.; JONES, K. D.; MILLS, P. L. **A citrus waste-based biorefinery as a source of renewable energy: technical advances and analysis of engineering challenges.** *Waste Management & Research*, v. 31, n. 4, p. 413–420, 2013. Disponível em: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242X13479432>.

ROSA, M.F.; MATTOS, A.L.A.; CRISOSTOMO, L.A.; BEZERRA, F.C. CORREIA, D.; VERAS, L.G.C. **Beneficiamento da casca do coco verde.** EMBRAPA, 2011.

SILVA, A. C. Reaproveitamento da casca de coco verde. **Revista Monografias Ambientais (REMOA)**, v. 13, n. 5, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2236130815186>. Acesso em: 3 mar. 2024.

SILVA, G. O.; JERÔNIMO, C. E. Estudo de alternativas para o aproveitamento de resíduos sólidos da industrialização do coco. **Revista Monografias Ambientais (REMOA)**, v. 10, n. 10, p. 2193–2208, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/223613086935>. Acesso em: 3 mar. 2024

SINDICOCO - PORTAL SUSTENTABILIDADE. **Os impactos da casca do coco verde frente à ODS 11**. Disponível em: <https://portalsustentabilidade.com/2023/08/03/os-impactos-da-casca-do-coco-verde-frente-a-ods11/>. Acesso em: 19 fev. 2024.

SOUZA, E.S.; BRITO, R.A.; CAMPOS, N.L.F.; RAMOS, D.P. Aplicação da fibra de coco no processo de isolamento térmico e acústico. **Revista de Gestão Sustentável e Ambiental**, Florianópolis, 2015.

THERMO FISHER SCIENTIFIC. **How it works: automated, compact solution for comprehensive elemental analysis**. Research & Development World, 26 jul. 2017. Disponível em: <https://www.rdworldonline.com/how-it-works-automated-compact-solution-for-comprehensive-elemental-analysis/>. Acesso em: 14 set. 2024.

THERMO FISHER SCIENTIFIC. **Thermo Scientific™ Precision™ 6500 series ultra-low freezer**. Disponível em: <https://www.medicalexpo.com/pt/prod/thermo-scientific/product-78678-507468.html>. Acesso em: 19 dez. 2024.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Provisional State of the Global Climate 2023**. Geneva: WMO, 2023. Disponível em: <https://library.wmo.int>. Acesso em: 14 abr. 2024.