



UFC

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ

CAMPUS DE RUSSAS

GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

JÉSSICA DE SOUSA CARVALHO

**ANÁLISE IMEDIATA E AVALIAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR DA
BIOMASSA DE CARNAÚBA COM DIFERENTES AGLUTINANTES PARA USO EM
FORNO INDUSTRIAL**

RUSSAS

2022

JÉSSICA DE SOUSA CARVALHO

DETERMINAÇÃO E AVALIAÇÃO DO PODER CALORÍFICO DA BIOMASSA DE
CARNAÚBA COM DIFERENTES AGLUTINANTES PARA USO EM FORNO
INDUSTRIAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do título de
Bacharela em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Profa. Dra. Silvia Teles Viana

RUSSAS

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- C324a Carvalho, Jéssica de Sousa.
Análise imediata e avaliação do poder calorífico superior da biomassa de carnaúba com diferentes aglutinantes para uso em forno industrial / Jéssica de Sousa Carvalho. – 2022.
63 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Mecânica, Russas, 2022.
Orientação: Profa. Dra. Silvia Teles Viana.
1. Carnaúba. 2. Poder Calorífico. 3. ANOVA. 4. Aglomerante. 5. Biomassa. I. Título.

CDD 620.1

JÉSSICA DE SOUSA CARVALHO

DETERMINAÇÃO E AVALIAÇÃO DO PODER CALORÍFICO DA BIOMASSA DE
CARNAÚBA COM DIFERENTES AGLUTINANTES PARA USO EM FORNO
INDUSTRIAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do título de
Bacharela em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 08/02/2022

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Silvia Teles Viana (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Dmontier Pinheiro Aragão Jr.
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Ms. Ramon Rudá Brito Medeiros
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

A minha mãe, Célia. Aos meus irmãos,
Jefferson e Querginaldo, aos meus sobrinhos,
Lara e João Arthur. Ao meu companheiro, João
Ravelly e a minha avó (em memória), Marilza.

AGRADECIMENTOS

À Deus pela vida e força. Por nunca me deixar sozinha. Por ter me guiado e consolado nos momentos difíceis dessa trajetória.

À minha mãe, Célia Facundo, por ser o meu maior exemplo de força e coragem. Por estar comigo em todos os momentos felizes e tristes da minha vida. Por nunca medir esforços para me ajudar. Por sempre acreditar em mim e nos meus sonhos.

Ao meu pai, Francisco Martins, por ser meu amigo e incentivador.

Ao meu namorado, João Ravelly, por tudo, por tanto e por sempre estar ao meu lado. Por todo amor, carinho, companheirismo, amizade, cuidado e incentivo.

Ao meu irmão, Jefferson, por acordar às 4h da manhã para me levar ao ponto de ônibus, mesmo sem entender o quão importante aquela ajuda era para mim.

Ao meu irmão Querginaldo, por me ajudar a nunca desistir. Por ser âncora quando eu precisei de um abraço de pai.

A minha cunhada Cecília Grigório por estar comigo quando eu mais precisei. Por sempre acreditar no meu potencial e por não me deixar desistir.

A minha cunhada Tayane Rodrigues por se alegrar com as minhas vitórias.

Aos meus sobrinhos, Lara e João Arthur, por serem os melhores presentes que a vida já me deu. Por serem a esperança de dias melhores.

A minha amiga e madrinha Anne Francielle por sempre estar comigo. Por todo amor e companheirismo.

A Universidade Federal do Ceará por todas as oportunidades. Por ser morada de tantos sonhos realizados e por valorizar os seus estudantes.

Aos meus amigos e colegas de formação Marcos Rogério, Pedro Honorato, Samuel Carvalho, Amanda Accorsini e Yuri Castro por estarem comigo quando os perrengues da graduação apertavam. Por todos os sorrisos e por deixarem esta caminhada mais leve.

Aos meus amigos, sócios e companheiros de sonho empreendedor, Lázaro Loiola e João Marcos Sales. Sem vocês este projeto não seria possível.

A Profa. Dra, Silvia Teles Viana por ser inspiração de mulher na engenharia mecânica, por todos os seus ensinamentos e pela excelente orientação.

Ao Prof. Dr. Markos Oliveira por me resgatar quando acreditei que deveria desistir. Por me lembrar que sou muito mais que a minha ansiedade.

Aos professores Ramon Rudá Brito Medeiros e Dmontier Pinheiro Aragão Júnior por todos os ensinamentos e orientações em projetos e trabalhos acadêmicos. E ainda, pelas contribuições neste trabalho.

A todos os professores que fizeram parte da minha formação acadêmica, cada um teve uma contribuição essencial para que hoje eu chegasse até aqui.

A Assistência Estudantil do Campus de Russas pois, sem os programas de auxílio psicológico e financeiro, eu não teria condições de concluir a graduação.

A Cimento Apodi por todo conhecimento adquirido durante o estágio. Pela disponibilidade e auxílio na realização dos ensaios desta pesquisa no Laboratório de Qualidade.

A Francisco Adeilson (analista de coprocessamento), Álvaro Wayne e Nataniel Ribeiro (técnicos de laboratório) pelo auxílio na realização dos ensaios no Laboratório de Qualidade da Cimento Apodi.

A Cybelle Borges pela orientação do estágio e por todos os ensinamentos.

Aos produtores de carnaúba por acreditarem neste projeto.

“A única jornada impossível é aquela que nunca iniciou.”

Tonny Robbins

RESUMO

Com o objetivo de viabilizar o uso de novas fontes alternativas de energia e visando o reaproveitamento dos subprodutos do processo agrícola da região do Vale do Jaguaribe, foi constatada a possibilidade de produção de biomassa a partir do talo de carnaúba (*Copernicia prunifera*). Para que seja possível utilizar o resíduo do processo extrativista da carnaúba como biomassa, o talo deve ser beneficiado (triturado e compactado/briquetado) e vendido para indústrias que necessitam de calor em seus processos produtivos. Para viabilizar a comercialização e a compactação desta biomassa, o presente trabalho teve como objetivo principal identificar qual a melhor combinação entre talo de carnaúba e material aglutinante para ser utilizado como biomassa em forno de indústrias de transformação, tomando como referência o poder calorífico superior (PCS) por meio da Análise Imediata e da Análise de Variância (ANOVA). Para isto, foi realizada a análise imediata (Teor de umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo), determinação de Poder Calorífico Superior para detalhamento do material, além do teste ANOVA e ANOVA *Two Way* para as análises estatísticas. Foram selecionados o talo seco de carnaúba como biomassa base e fibra de coco verde, casca de castanha de caju e cavaco de cajueiro como aglomerantes. O estudo foi realizado em concentrações de 60%, 70% e 80% de talo e 40%, 30% e 20%, respectivamente, de cada resíduo selecionado como aglomerante. Todas as análises foram feitas em triplicata. Como resultado foi visto que casca de castanha é a biomassa mais indicada para a utilização do *blend* de carnaúba como combustível sólido. A composição de 80% carnaúba e 20% de casca da castanha de caju apresentou teor de umidade de 9,60%, teor de voláteis de 83,50%, teor de cinzas de 5,16%, teor de carbono fixo de 27,58% e poder calorífico superior de 19,04 [MJ/kg], sendo este o maior deste estudo.

Palavras-chave: Carnaúba; Poder Calorífico; ANOVA; Aglomerante; Biomassa.

ABSTRACT

With the objective of enabling the use of new alternative energy sources and aiming at the reuse of the by-products of the agricultural process in the Jaguaribe Valley region, the possibility of producing biomass from the carnauba stalk (*Copernicia prunifera*) was verified. In order to be better used, the stalk must be processed (crushed and compacted/briquetted) and sold to industries that need heat in their production processes. In order to facilitate the commercialization and compaction of this biomass, the main objective of this work was to identify the best combination between carnauba stalk and binder material to be used as biomass in furnaces of transformation industries, taking as reference the superior calorific value (PCS) through Immediate Analysis and Analysis of Variance (ANOVA). For this, an immediate analysis was performed (Moisture content, volatiles, ash and fixed carbon), determination of Higher Calorific Power for detailing the material, in addition to ANOVA and *Two Way* ANOVA for statistical analysis. Dry carnauba stalks were selected as the base biomass and coconut fiber, cashew nut shell and cashew chips as binders. The study was carried out at concentrations of 60, 70 and 80% of stalk and 40, 30 and 20%, respectively, of each residue selected as binder. All analyzes were performed in triplicate. As a result, it was seen that chestnut shell is the most suitable biomass for the use of carnauba *blend* as solid fuel. The composition of 80% carnauba and 20% of cashew nut shell showed a moisture content of 9.60%, volatile content of 83.50%, ash content of 5.16%, fixed carbon content of 27, 58% and a higher calorific value of 19.04 [MJ/kg], which was the highest in this study.

Keywords: Carnauba; Calorific Power; ANOVA; Binder; biomass.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Cotação do Barril de Petróleo	17
Figura 2	– Matriz Energética Mundial 2019	18
Figura 3	– Matriz Energética Brasileira 2020	18
Figura 4	– Percentual de Energia Renovável utilizada no Brasil de 2010 a 2020	19
Figura 5	– Percentual de Energia Renovável e Não Renovável utilizada no Brasil	20
Figura 6	– Oferta interna de energia entre 2011 e 2020	20
Figura 7	– Diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa.	22
Figura 8	– Carnaúba	24
Figura 9	– Fluxograma geral da metodologia utilizada no laboratório	26
Figura 10	– Fluxograma geral da metodologia utilizada nas análises estatísticas	26
Figura 11	– Talo de carnaúba coletado em Jaguaruana/CE	27
Figura 12	– Moinho Herzog utilizado para transformar o material <i>in natura</i> em pó	28
Figura 13	– Balança analítica Ohaus	29
Figura 14	– Estufa utilizada para secagem das amostras	30
Figura 15	– Peneira de Análise Granulométrica	31
Figura 16	– Balança analítica de precisão Ohaus	31
Figura 17	– Forno Mufla	32
Figura 18	– Dessecador	33
Figura 19	– Bomba calorimétrica modelo	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Distribuição de amostras em concentração por aglomerante	28
Tabela 2	– Normas técnicas utilizadas como referência para as análises	29
Tabela 3	– Média do teor de umidade das amostras (%)	36
Tabela 4	– Referências para umidade das biomassas estudadas	37
Tabela 5	– ANOVA de fator duplo com repetição para Teor de Umidade	37
Tabela 6	– ANOVA <i>Two Way</i> para teor de umidade	38
Tabela 7	– Média do teor de voláteis das amostras (%)	39
Tabela 8	– Referências para teor de voláteis das biomassas estudadas.....	40
Tabela 9	– ANOVA de fator duplo com repetição para teor de voláteis	40
Tabela 10	– ANOVA <i>Two Way</i> para teor de voláteis	41
Tabela 11	– Média do teor de cinzas das amostras (%)	42
Tabela 12	– Referências para teor de cinzas das biomassas estudadas	43
Tabela 13	– ANOVA de fator duplo com repetição para teor de cinzas	43
Tabela 14	– Média do teor de carbono fixo das amostras (%)	44
Tabela 15	– Referências para teor de carbono fixo das biomassas estudadas	45
Tabela 16	– ANOVA de fator duplo com repetição para teor de carbono fixo	45
Tabela 17	– ANOVA <i>Two Way</i> para teor de carbono fixo	46
Tabela 18	– Média do poder calorífico superior (PCS) das amostras [MJ/kg]	47
Tabela 19	– Referências para poder calorífico superior (PCS) das biomassas estudadas	48
Tabela 20	– ANOVA de fator duplo com repetição para poder calorífico superior	48
Tabela 21	– ANOVA <i>Two Way</i> para poder calorífico superior (PCS)	49
Tabela 22	– Resultados das análises	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	ASTM American Society for Testing and Materials
PCS	Poder Calorífico Superior
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
CE	Estado do Ceará
Tu	Teor de Umidade
Tv	Teor de Voláteis
Tc	Teor de Cinzas
Tcf	Teor de Carbono Fixo
ANOVA	Análise de Variância
<i>Blend</i>	Junção de duas ou mais biomassas

LISTA DE SÍMBOLOS

\$	Dólar
%	Porcentagem
µm	Micrómetro
g	Gramas
°C	Graus Celsius
[MJ/kg]	Megajoule por quilograma

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	15
1.1.1	<i>Objetivo principal</i>	15
1.1.2	<i>Objetivos específicos</i>	15
1.2	Justificativa	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	Matriz Energética mundial e brasileira	17
2.2	Energia Renovável	18
2.3	Biomassa	21
2.4	Carnaúba	23
2.5	Análise Imediata	24
2.6	Aglomerantes	25
2.7	ANOVA	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1	Origem das amostras	27
3.2	Caracterização das amostras	27
3.3	Determinação da Análise Imediata da Biomassa	29
3.3.1	<i>Determinação do teor de umidade</i>	29
3.3.2	<i>Determinação do teor de materiais voláteis</i>	30
3.3.3	<i>Determinação do teor de cinzas</i>	33
3.3.4	<i>Determinação do carbono fixo</i>	33
3.3.5	<i>Determinação do poder calorífico superior (PCS)</i>	34
3.4	Análise estatística	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1	Teor de umidade	36
4.2	Teor de voláteis	39
4.3	Teor de cinzas	42
4.4	Teor de carbono fixo	44
4.5	Teor de poder calorífico superior (PCS)	47

4.6	Parecer técnico	50
5	CONCLUSÃO	51
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	51
	REFERÊNCIAS	52
	APÊNDICE A - TESTE ANOVA FEITO NO EXCEL PARA TEOR DE UMIDADE	56
	APÊNDICE B - TESTE ANOVA FEITO NO EXCEL PARA TEOR DE VOLÁTEIS	57
	APÊNDICE C - TESTE ANOVA FEITO NO EXCEL PARA TEOR DE CINZAS	58
	APÊNDICE D - TESTE ANOVA FEITO NO EXCEL PARA TEOR DE CARBONO FIXO	59
	APÊNDICE E - TESTE ANOVA FEITO NO EXCEL PARA PODER CALORÍFICO SUPERIOR	60

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de energia está presente no cotidiano, seja para cozinhar os alimentos, acender as lâmpadas ou ir de carro para o trabalho (EPE, 2021). A energia utilizada para estes e outros fins fazem parte de dois grandes grupos de fontes energéticas: renováveis e não renováveis (também chamadas de tradicionais); esses grupos compõem a matriz energética. Esta por sua vez representa o conjunto de fontes disponíveis em um estado, país ou no mundo, para suprir a necessidade (demanda) de energia.

Por conta dos impactos ambientais e sociais causados pelas fontes de energia tradicionais e na busca pela conservação dos recursos naturais, as grandes potências mundiais iniciaram a procura por fontes de energia alternativas com baixo custo e mais sustentáveis. Nesta busca por fontes alternativas, o Brasil apresenta grande diferencial em relação a outros países, pois a sua imensa biodiversidade, permite a geração de energia por vários meios, incluindo as fontes de energia renováveis como a hidrelétrica e também a busca pelo desenvolvimento de fontes alternativas como a utilização da biomassa, para produção de combustíveis renováveis, como o álcool, o biodiesel, e, mais recentemente, o H-bio (AGRONEGÓCIOS, 2006).

Biomassa é todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizado para produção de energias elétrica e térmica, além de combustíveis. Podem ser de origem animal (dejetos), florestal (troncos, galhos e folhas), agrícola (soja, arroz e cana-de-açúcar, entre outras) e rejeitos urbanos e industriais (TAVARES; TAVARES, 2015). Atualmente temos como principais exemplos desse tipo de material: a lenha, bagaço de cana-de-açúcar, cavaco de madeira, resíduos agrícolas, algas, restos de alimentos e até excremento animal que, após sua decomposição, produz gases que são usados para gerar energia. De forma simplória, são os subprodutos da pecuária, da agricultura e de outras atividades, assim como a parte biodegradável de resíduos sólidos urbanos. Ela pode ser queimada diretamente, como no forno de indústrias cimenteiras para aproveitamento do calor (coprocessamento de resíduos). Ou ainda pode ser utilizada para aquecer água e produzir vapor em alta pressão, onde este vapor rotaciona uma turbina conectada a um gerador que gera eletricidade. A cogeração permite a geração simultânea de eletricidade e calor, recuperando parte do vapor gerado.

O progresso no desenvolvimento de alternativas para a energia de biomassa, além de

aliviar a pressão em recursos finitos de combustíveis fósseis, pode reduzir os custos de mitigação de emissões de carbono. Para que seja possível a descoberta de novas fontes de biomassa é necessário que haja uma investigação, primeiramente, no ambiente em que se vive. No estado do Ceará há uma variedade de árvores que se destacam por sua densidade como, por exemplo, cajueiro, pau-branco, catingueira, oiti, jucá, juazeiro, jurema, sabiá, caraíba e carnaúba. Posterior a isso, é preciso entender o processo produtivo ao qual a planta está submetida e se há viabilidade calorífica em seus resíduos.

Símbolo do Estado desde 2004, a Carnaúba é chamada de árvore da vida por resistir a longos períodos de seca. A Carnaúba (*Copernicia prunifera* (Mill.) H.E.) é uma palmeira xerófila, ocorrente em áreas fluviais, endêmica do semiárido, com múltiplos usos e de grande contribuição na economia de vários estados do Nordeste brasileiro (GONÇALVES *et al.*, 2020). Da carnaúba é extraída a cera das folhas, que é um produto amplamente utilizado em diversos segmentos industriais, gerando com essa extração o resíduo da palha (bagana de carnaúba), material geralmente descartado e queimado nas propriedades, mas que apresenta grande potencial de reaproveitamento (FERREIRA *et al.*, 2013; SILVA *et al.*, 2018). Além da palha, esta atividade extrativista possui o talo da palha como resíduo do processo.

Neste sentido, a ideia central deste trabalho foi investigar qual a combinação mais eficiente entre o talo de carnaúba e os aglomerantes selecionados (casca de castanha e cavaco de cajueiro) baseado nas propriedades de teor de umidade, teor de materiais voláteis, teor de cinzas, carbono fixo e poder calorífico superior, para contribuir com a compactação e posterior logística desta biomassa.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo principal

O presente trabalho teve como objetivo principal identificar qual a melhor combinação entre talo de carnaúba e material aglutinante para ser utilizado como biomassa em forno de indústrias de transformação, tomando como referência o poder calorífico superior (PCS) por meio da Análise Imediata e da Análise de Variância (ANOVA).

1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar a Análise Imediata (teor de umidade, teor de materiais voláteis, teor de cinzas, carbono fixo, poder calorífico superior) das amostras de talo de carnaúba com os aglutinantes.

- Comparar o poder calorífico superior (PCS) das amostras aglutinadas com o poder calorífico superior (PCS) das biomassas *in natura*.
- Utilização da combinação escolhida (talo de carnaúba e material aglutinante) em projeto de comercialização de biomassa na região do Vale do Jaguaribe
- Comparar os resultados dos diferentes parâmetros estudados com trabalhos anteriores

1.2 Justificativa

Na Região do Vale do Jaguaribe no Ceará, a atividade extrativista proveniente da Carnaúba é muito presente na cultura da população e é fonte de renda para muitas famílias. Segundo Carvalho (2009), a extração do pó de carnaúba a partir das folhas, têm grande importância na geração de emprego e renda complementar no campo por ser a matéria-prima da cera, visto que a mesma possui inúmeras aplicações no ramo industrial. Além da bagana (nome que se dá à palha depois de seca ao sol por um período de 6 a 12 dias para extração do pó), o talo que é deixado após o corte da mesma também é um subproduto do processo extrativista visto como resíduo nas propriedades.

Para que seja melhor aproveitado, o talo pode ser beneficiado (triturado e compactado/briquetado) e vendido para indústrias que necessitam de calor em seus processos produtivos. Como, por exemplo, indústrias cimenteiras, indústrias de papel e celulose, indústrias de alimentos e bebidas e indústrias ceramistas. Porém, como este material é leve e fibroso, acaba por ocupar muito espaço no transporte (independentemente do modelo) que leva a biomassa para as fábricas.

Desta forma, para que possa haver viabilidade econômica na comercialização do produto proveniente deste reaproveitamento de resíduos, é necessário que se tenha maior densidade nessa logística. Também há a necessidade por parte das indústrias em adquirir biomassa com poder de combustão satisfatória, para que assim, não haja prejuízos em seus processos produtivos ao utilizar combustível alternativo.

Neste sentido, o presente trabalho tem como finalidade determinar qual aglomerante mais eficiente em termos de poder calorífico superior (PCS). Possibilitando a inserção desta nova biomassa no mercado e, por conseguinte, maior qualidade no material compactado. Além de novas oportunidades de trabalho para agricultores, em específico, os carnaubeiros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Matriz Energética mundial e brasileira

A matriz energética representa o conjunto de fontes disponíveis em um país, estado, ou no mundo, para suprir a necessidade e demanda de energia (EPE, 2021). A matriz energética mundial, assim como a brasileira, ainda é dependente da utilização de fontes não-renováveis de energia. Porém, a mudança deste cenário é de interesse de todos.

Isto ocorre por conta da possibilidade na redução dos recursos utilizados para a produção de energia, a degradação do meio ambiente causada pelo uso indiscriminado de passivos e a preocupação com o aumento do preço do petróleo e seus derivados. Em 2021, o preço médio do petróleo, combustível mais utilizado no mundo, aumentou em 66%, maior valor desde 2014. O valor médio saiu de US\$48 por barril no início do ano para US\$80, como mostra a Figura 1.

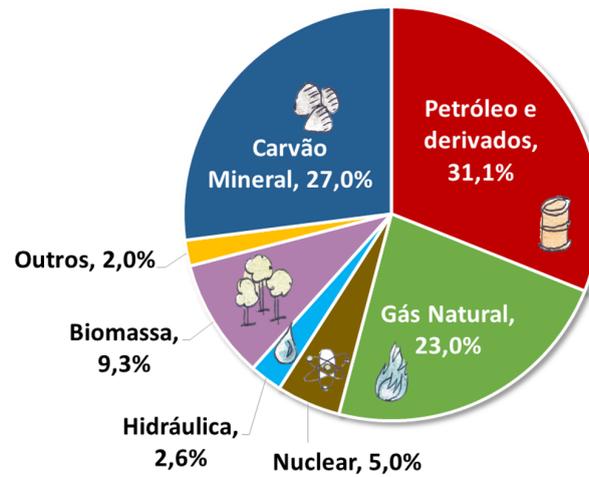
Figura 1. Cotação do Barril de Petróleo



Fonte: Elias (2021)

Fontes renováveis como solar, eólica e geotérmica, por exemplo, juntas correspondem a apenas 2% da matriz energética mundial, assinaladas como “Outros” no gráfico. Somando à participação da energia hidráulica e da biomassa, as renováveis totalizam aproximadamente 14% (EPE, 2021).

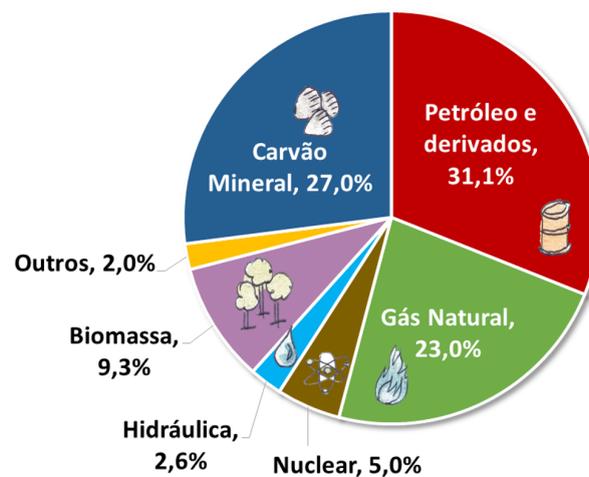
Figura 2. Matriz Energética Mundial 2019



Fonte: International Energy Agency (2021)

A atual matriz energética brasileira é diversificada em relação à quantidade de fontes geradoras de energia. Mesmo com a maior porcentagem advinda dos combustíveis fósseis, o Brasil se encontra como um dos maiores utilizadores de energia renovável no mundo. Segundo dados do Balanço Energético Nacional do ano de 2021, a oferta interna de energia está centrada na queima de fontes fósseis, principalmente, petróleo e seus derivados, conforme pode-se observar na Figura 3.

Figura 3. Matriz Energética Brasileira 2020



Fonte: Balanço Energético Nacional (2021)

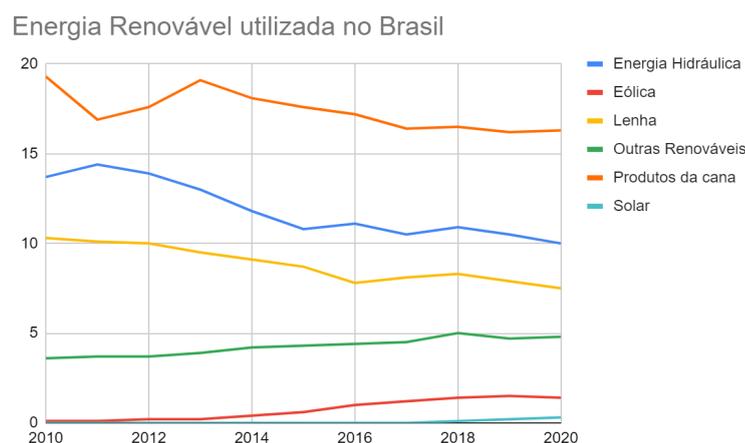
2.2 Energia Renovável

Energias Renováveis são aquelas que se renovam naturalmente em um curto período de tempo através de ciclos de conversão da energia solar irradiada no planeta através de processos naturais (PACHECO, 2006). Segundo Goldemberg (2007), as fontes renováveis de energia são repostas imediatamente pela natureza; é o caso dos potenciais hidráulicos (quedas d'água), eólicos (ventos), a energia das marés e das ondas, a radiação solar e o calor do fundo da Terra (geotermal).

Devido aos impactos negativos causados pelo uso de combustíveis fósseis, o Brasil vem buscando a ampliação de sua matriz energética e investindo em fontes de energia renováveis. Por conta de suas riquezas naturais e extensão territorial, o mesmo possui uma ampla lista de possíveis fontes a serem utilizadas no atendimento das suas demandas energéticas.

No Brasil há um enorme potencial de energia, solar, eólica e energia proveniente da biomassa, para além do potencial hídrico que já é bastante utilizado. A biomassa tem uma participação importante na matriz energética do país, com uma colaboração de 9,1% na oferta de energia elétrica (BEN, 2021). Dentro da categoria de biomassa, a cana-de-açúcar é a fonte mais representativa, utilizada para a produção de etanol e eletricidade.

Figura 4. Percentual de Energia Renovável utilizada no Brasil de 2010 a 2020

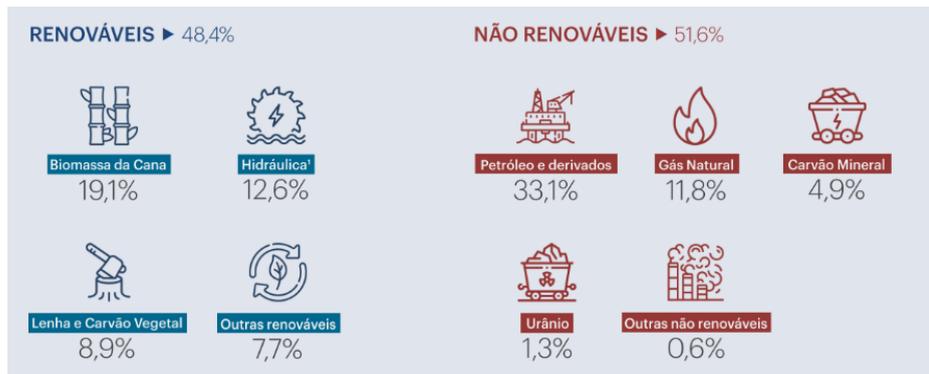


Fonte: EPE, Empresa de Pesquisa Energética - BEN Interativo (2021)

No ano de 2020, as fontes de energia renovável representaram 48,4% da produção nacional, conforme observa-se na Figura 5. Vale ressaltar que o ano de 2020 marca o início da

Pandemia Mundial do Coronavírus (Covid-19) e que neste ano o valor do barril de petróleo subiu consideravelmente. Por conta desse aumento, os investimentos em energias renováveis foram crescentes, o que demonstra a importância deste tipo de fonte alternativa de energia.

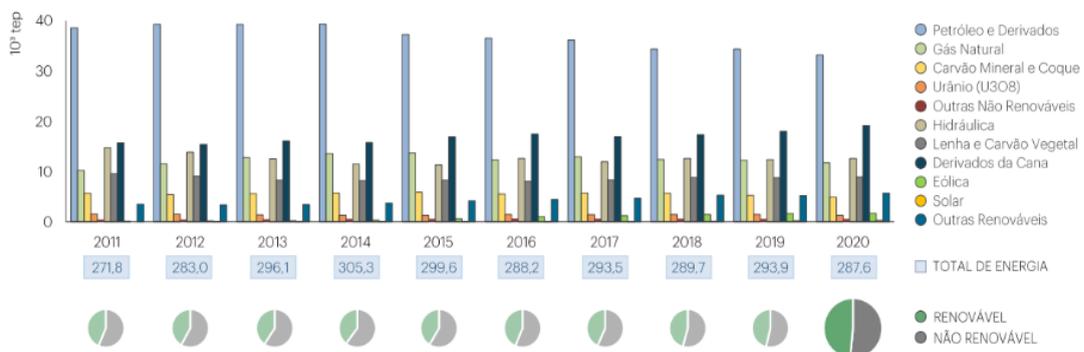
Figura 5. Percentual de Energia Renovável e Não Renovável utilizada no Brasil



Fonte: EPE, Empresa de Pesquisa Energética, Balanço Energético Nacional 2021 - Ano base 2020

A demanda por energia tem pressionado os governos para o desenvolvimento de sistemas e tecnologias eficientes e a diversificação de suas fontes de suprimento, principalmente em energias limpas e renováveis (OLIVEIRA; ZANIN, 2015). Na Figura 6 pode ser observado o comparativo das energias renováveis e não renováveis ofertadas no Brasil entre os anos de 2011 e 2020. Nota-se que houve uma redução da participação das renováveis na matriz entre os anos de 2011 e 2014 devido à queda da oferta hidráulica. A partir de 2015, as fontes renováveis de energia retomaram uma trajetória de crescimento com a expansão de biomassa e energia eólica, atingindo 48,4% em 2020 (BEN, 2021).

Figura 6. Oferta interna de energia entre 2011 e 2020



Fonte: Balanço Energético Nacional (2021)

Os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) são metas que foram lançadas em setembro de 2015, durante a Cúpula de Desenvolvimento Sustentável, na Assembleia Geral da ONU; é composta por 17 itens – tais como erradicar a pobreza, a fome, assegurar educação inclusiva e energia acessível e limpa – que devem ser implementados por todos os países do mundo até 2030. Nesse cenário, o ODS 7 (Energia acessível e limpa) reconhece a importância e traça metas focadas na transição energética, com especial atenção às necessidades das pessoas e países em situação de maior vulnerabilidade. O compromisso é de que as energias renováveis estejam acima de 80% até 2030, chegando a 85% em 2050.

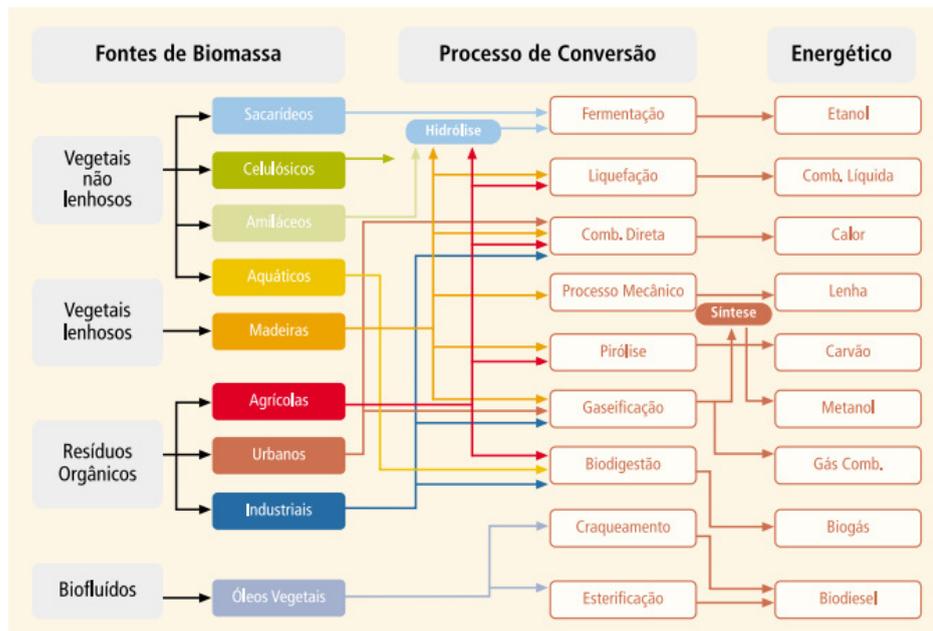
2.3 Biomassa

A biomassa é uma fonte de energia renovável e, se utilizada da maneira correta, pode ser sustentável (VIDAL; HORA, 2011). O termo biomassa abrange uma grande variedade de materiais incluindo resíduos de culturas agrícolas, madeira, plantas marinhas, resíduos florestais, resíduos de pesca, polpa de celulose, lixívia, vinhaça e outros resíduos industriais orgânicos, lixo urbano e doméstico e lodo de esgoto (Yokoyama e Matsumura, 2008).

Mundialmente, a biomassa é considerada uma das fontes de energia com maior potencial de crescimento de utilização no futuro (ANEEL, 2008), pois é possível o aproveitamento de vários tipos diferentes de matéria orgânica para fins energéticos o que permite consequentemente a utilização, inclusive, de alguns rejeitos como matéria-prima. Atualmente, a mesma vem sendo cada vez mais utilizada na geração de eletricidade, especialmente, em sistemas de cogeração e no suprimento de eletricidade para demandas isoladas da rede elétrica (ANEEL, 2015).

A obtenção de energia através de biomassa pode ser explicada de forma simplificada como a conversão de uma matéria-prima orgânica, como a cana-de-açúcar ou madeira, em um produto intermediário que, por sua vez, pode ser transformado em energia mecânica através de uma máquina específica (ANEEL, 2008). A energia presente na biomassa pode ser transformada, mediante processos de conversão biológicos, físicos e químicos, em combustíveis gasosos (biogás), líquidos (etanol e biodiesel) e sólidos (carvão vegetal e lenha), conforme mostra a Figura 7. O principal objetivo dessa conversão é transformar um material carbonáceo de baixa eficiência energética, em um material de eficiência energética viável do ponto de vista econômico (AÇMA, 2003).

Figura 7. Diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa.



Fonte: Ministério de Minas e Energia (2007)

No Brasil, biomassas lignocelulósicas constituem enorme potencial de aproveitamento energético (MACEDO, 2012). A energia produzida a partir dessas matérias-primas apresenta vantagens como redução dos impactos ambientais provocados pela queima e descarte, geração de postos de trabalho em mini usinas e em unidades de transformação dos resíduos, inovações tecnológicas e possibilidade de expansão da capacidade produtiva (MACHADO, 2015).

De acordo com NOGUEIRA e LORA (2002), a biomassa como recurso energético pode ser dividida em três grupos principais:

- Biomassa energética florestal: são as biomassas provenientes dos recursos florestais, seus produtos e subprodutos, que incluem biomassa lenhosa, produzida de forma sustentável a partir de florestas cultivadas ou de florestas nativas, obtida por supressão vegetal, ou ainda originada em atividades que processam ou utilizam a madeira para fins não energéticos, destacando-se a indústria de papel e celulose, podas de árvores, indústria moveleira e serrarias.
- Biomassa energética agrícola: são as biomassas provenientes das plantações não florestais, tipicamente originados de colheitas anuais, cujas culturas são selecionadas segundo as propriedades de teores de amido, celulose, carboidratos e lipídios, contidos

na matéria, em função da rota tecnológica a que se destina. Podem ser divididos em duas subcategorias:

- Culturas agroenergéticas: utilizando principalmente rotas tecnológicas de transformações biológicas e físico-químicas como a fermentação, hidrólise e esterificação, empregadas para a produção de combustíveis líquidos como o etanol, o biodiesel e os óleos vegetais diversos. Integram estas culturas a cana de açúcar, o milho, o trigo, a beterraba, a soja, o amendoim, o girassol, a mamona e o dendê.
- Subprodutos das atividades agrícolas, agroindustriais e da produção animal: uma expressiva quantidade de subprodutos resultantes das atividades agrícolas, agroindustriais e da produção animal é tratada como resíduo, porém possui potencial energético importante, que varia segundo a rota tecnológica empregada, que pode variar desde a transformação termoquímica com combustão direta, pirólise ou gaseificação, passando pelas transformações biológicas e físico-químicas, incluindo a digestão anaeróbica. Como exemplos destas culturas temos o esterco animal, a casca de arroz, a casca da castanha de caju e o talo da carnaúba;
- Rejeitos urbanos: a biomassa contida em resíduos sólidos e líquidos urbanos têm origem diversa e se encontra no lixo e no esgoto. O lixo urbano é uma mistura de metais, plásticos, vidros, resíduos celulósicos e vegetais, e matéria orgânica. As rotas tecnológicas de seu aproveitamento energético são: a combustão direta, a gaseificação pela via termoquímica e a digestão anaeróbica na produção de biogás, pela via biológica. O esgoto urbano possui matéria orgânica residual diluída, cujo tratamento é uma imposição sanitária que, através da rota tecnológica de digestão anaeróbica, encontra aplicação energética.

Os resíduos de atividades florestais representam 65% do potencial energético da biomassa, enquanto que os resíduos de culturas agrícolas são de 33% (WERTHER et al 2000).

2.4 Carnaúba

A carnaubeira, *Copernicia prunifera*, que pertence à família das Arecaceae, é uma espécie de palmeira que habita exclusivamente às margens de rios da região semiárida do Nordeste brasileiro, principalmente nos estados do Ceará, Rio Grande do Norte e Piauí, sendo

que em algumas localidades dos estados mencionados, é a única forma de atividade de renda durante os períodos de estiagem (DANTAS, 2014).

Figura 8. Carnaúba



Fonte: Elaborada pelo autor

Também conhecida como a “árvore da vida”, “aquela que tudo provê”, “ouro verde” é uma árvore resistente a diferentes condições de solo e clima. Essa espécie de palmeira geralmente cresce em solos argilosos e aluviais, o que a condiciona a suportar períodos intensos de alagamento e capacidade de resistir a elevados teores salinos, sendo considerada uma vegetação halófito (DANTAS, 2014).

O Decreto-Lei nº 27.413, de 30.03.2004, instituiu a carnaúba como símbolo do Estado. É protegida por lei e se encontra no brasão do Estado do Ceará. O artigo 2º estabelece que a derrubada e o corte da carnaúba ficam condicionados à autorização dos órgãos e entidades estaduais competentes. Esse Decreto levou em consideração a importância de promover a conservação da biodiversidade, do desenvolvimento sustentável e do reconhecimento do valor histórico, cultural e paisagístico da árvore.

2.5 Análise Imediata

Esta análise refere-se ao conteúdo percentual, relacionado à massa do material combustível, podendo ser dividida em: teor de umidade, correspondendo à quantidade de água

livre presente na biomassa, teor de material volátil, que expressa a capacidade de combustão do material, teor de cinzas, porção remanescente de fração inorgânica após a calcinação e teor de carbono fixo, material resultante após decomposição dos voláteis (PONTE, 2017). De uma maneira ideal, estes testes devem cumprir padrões e normas internacionais aceitos e serem conduzidos sob os mais rígidos controles de laboratório.

2.6 Aglomerantes

Um aglomerante, aglutinante ou ligante é um material que tem a finalidade de aglomerar outros materiais (agregados), influenciando desta forma a resistência do material resultante. As principais características dos aglutinantes utilizados na produção dos briquetes devem ser: alta taxa aglutinante; inexistência de material inerte em sua composição; barato e abundante; simplicidade de uso; alta resistência mecânica; resistência à umidade; e boas condições de operacionalidade (BENÍCIO, 2011).

O aglutinante escolhido não deve prejudicar as características energéticas do carvão, diminuindo o rendimento calorífico, aumentando o teor de voláteis e cinzas, e seu custo não poderá inviabilizar economicamente o briquete (FONTES et al., 1989).

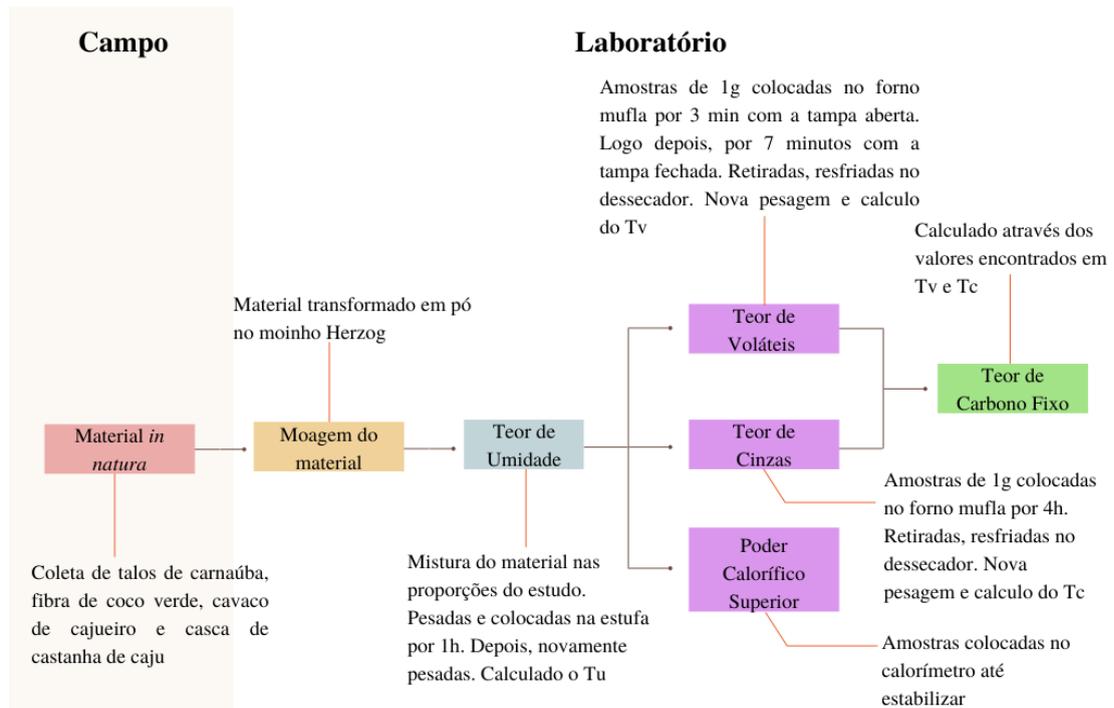
2.7 ANOVA

A Análise de Variância (ANOVA - Analysis of Variance) é uma ferramenta para comparação de vários grupos ou estratos de interesse (Montgomery, 1991). Este teste permite investigar a existência de diferenças significativas entre os grupos estudados. A ANOVA utiliza-se do Teste F, que é a probabilidade bi-caudal de que as variâncias das amostras analisadas possuem diferenças significativas. Se o valor do $F_{crítico}$ encontrado for menor que o valor do $F_{calculado}$, significa que a variável analisada influencia significativamente no seu resultado, para o grau de confiança estabelecido. Porém, o valor F identifica apenas a existência ou não de diferenças nos grupos analisados, mas seu valor ou resultado não aponta em quais grupos as médias se diferenciam (WISE, 1990). Neste sentido, foram desenvolvidos os testes *Two Way*, que têm como finalidade avaliar em quais grupos ocorre esta diferenciação, sendo sua aplicação quase de caráter obrigatório, haja vista que o pesquisador só pode afirmar especificidades nas análises de seu estudo com a aplicação desses testes (TABACHNICK; FIDELL; OSTERLIND, 2001).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

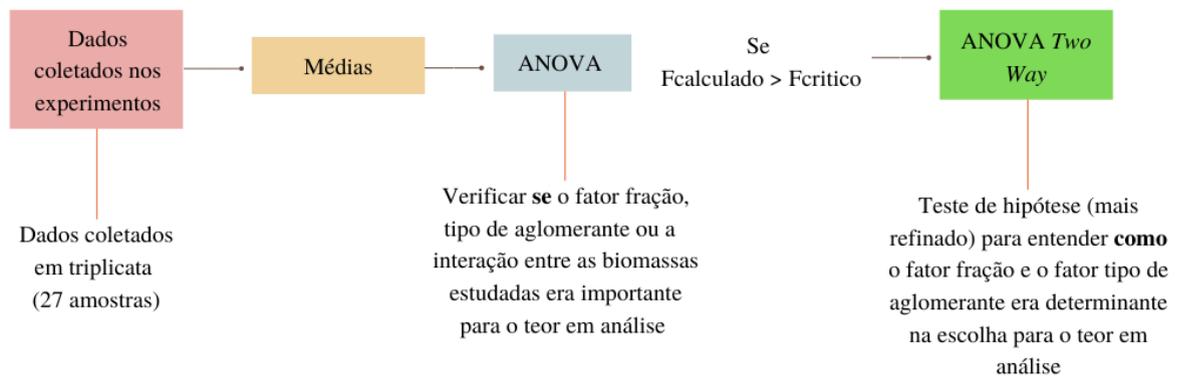
O estudo foi realizado em duas etapas: análises laboratoriais (Figura 9), seguido de análises estatísticas (Figura 10).

Figura 9. Fluxograma geral da metodologia utilizada no laboratório



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 10. Fluxograma geral da metodologia utilizada nas análises estatísticas



Fonte: Elaborada pelo autor

3.1 Origem das amostras

Os talos secos de carnaúba utilizados nas amostras do estudo foram gentilmente cedidos por um produtor rural da comunidade Furtuoso em Jaguaruana/CE (Figura 11). Os resíduos escolhidos como aglutinantes foram cedidos pelo setor de coprocessamento da Companhia Industrial de Cimento Apodi em Quixeré/CE. Os materiais utilizados foram selecionados através de três critérios: Ser um resíduo ou subproduto de atividades agrícolas, estar disponível no Vale do Jaguaribe ou em suas proximidades e ser um material que já tenha sido caracterizado como interessante em termos de poder calorífico superior. As análises foram feitas nos Laboratórios de Qualidade e Microscopia na referida fábrica.

Figura 11. Talos de carnaúba coletados em Jaguaruana/CE



Fonte: Elaborada pelo autor

3.2 Caracterização das amostras

Como biomassa base foi utilizado o talo seco da Carnaúba (*Copernicia prunifera*) e como aglutinantes foram utilizados poda de cajueiro (*Anacardium occidentale*), casca de castanha de caju e fibra do coco verde. As amostras foram coletadas in natura, e para serem transformadas em pó foi utilizado o Moinho Herzog (Figura 12). O estudo foi realizado em concentrações de 60, 70 e 80% de carnaúba seca e 40, 30 e 20%, respectivamente, de cada resíduo selecionado como aglutinante. Todas as análises foram feitas em triplicata como mostra a Tabela 1.

Tabela 1. Distribuição de amostras em concentração por aglomerante

		Fator B - Tipo de aglomerante								
		A. Fibra do coco verde			B. Casca da castanha de caju			C. Cavaco de cajueiro		
Fator A - Concentração de aglomerante	1. 60% de carnaúba seca e 40% de aglomerante	A11	A12	A13	B11	B12	B13	C11	C12	C13
	2. 70% de carnaúba seca e 30% de aglomerante	A21	A22	A23	B21	B22	B23	C21	C22	C23
	3. 80% de carnaúba seca e 20% de aglomerante	A31	A32	A33	B31	B32	B33	C31	C32	C33

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 12 . Moinho Herzog utilizado para transformar o material *in natura* em pó

Fonte: Elaborada pelo autor

As propriedades estudadas foram: teor de umidade, materiais voláteis, teor de cinzas, carbono fixo e poder calorífico superior; seguindo as normas listadas na Tabela 2 em seu método analítico.

Tabela 2 – Normas técnicas utilizadas como referência para as análises

Parâmetro analítico	Norma utilizada
Teor de umidade (%)	ASTM D3173-18
Teor de voláteis (%)	ASTM D3175-18
Teor de cinzas (%)	ASTM D3174-18
Teor de carbono fixo (%)	ASTM D3172-13
Teor de poder calorífico superior (MJ/kg)	ASTM E711-87

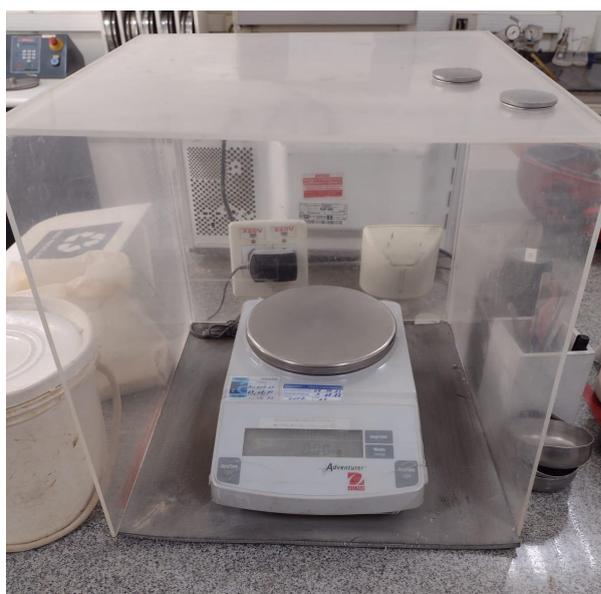
Fonte: Elaborada pelo autor

3.3 Determinação da Análise Imediata da Biomassa

3.3.1 Determinação do teor de umidade

Utilizou-se uma balança Analítica da fabricante Ohaus, linha Adventurer e modelo ARD110 com precisão de $\pm 0,01$ g (Figura 13) para determinação de massa úmida de cada amostra. Posteriormente, as amostras foram levadas a uma estufa da marca Quimis (Figura 14) com temperatura de 120 ± 10 °C por uma hora. Após isso, retirou-se as amostras e esperou-se dez minutos para a massa da amostra estabilizar, e foi feita uma nova pesagem, obtendo-se agora o valor da massa seca.

Figura 13. Balança analítica Ohaus.



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 14. Estufa utilizada para secagem das amostras.



Fonte: Elaborada pelo autor

Os teores de umidade foram obtidos pela diferença entre as massas da amostra, antes e após a secagem (Equação 1):

$$Tu = ((m_1 + m_2) \div m_1) \times 100\% \quad (1)$$

Onde:

Tu: teor de umidade da amostra em base úmida, em porcentagem (%)

m_1 : massa inicial da amostra, antes da secagem (g)

m_2 : massa final da amostra, após a secagem (g)

3.3.2 Determinação do teor de materiais voláteis

Na preparação inicial da análise, após a retirada da umidade, cada amostra foi colocada em uma peneira de análise granulométrica da marca Solotest com aberturas de $300\mu\text{m}$ e $150\mu\text{m}$, como mostra a Figura 15.

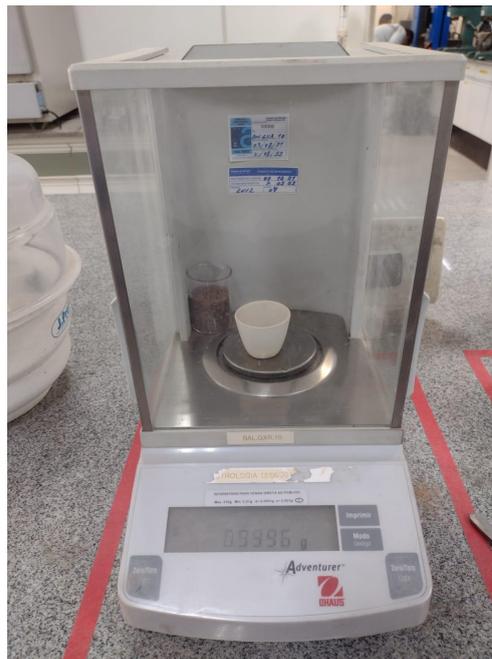
Figura 15. Peneira de Análise Granulométrica



Fonte: Elaborada pelo autor

Após a separação do material, foram pesadas amostras de aproximadamente 1g em uma balança analítica de precisão da fabricante Ohaus, linha Adventurer, modelo AR2140 com precisão de $\pm 0,0001$ g (Figura 16).

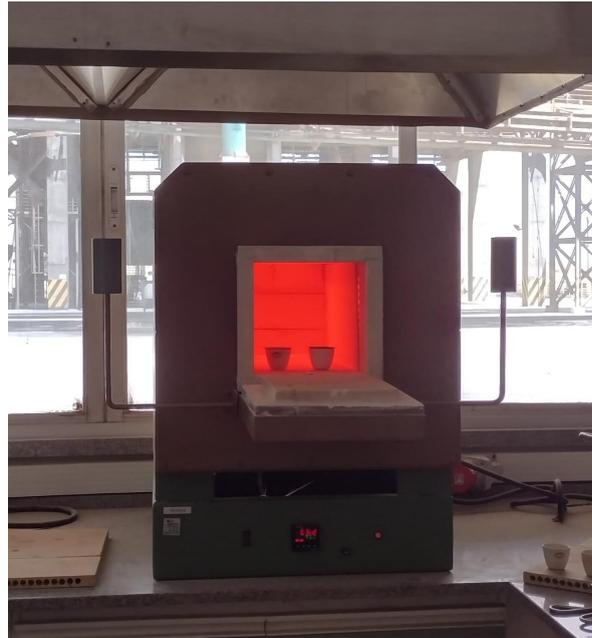
Figura 16 . Balança analítica de precisão Ohaus.



Fonte: Elaborada pelo autor

Estas foram colocadas em cadinhos de platina e levadas para o forno mufla (Figura 17), cujo qual estava aquecido a uma temperatura de 900 ± 10 °C. Inicialmente, foi colocado o cadinho no forno mufla com tampa aberta durante três minutos, e logo após mais sete minutos com o cadinho dentro do forno mufla com a tampa fechada, como instruído na norma.

Figura 17. Forno Mufla.



Fonte: Elaborada pelo autor

Posteriormente a este tempo, as amostras foram inseridas em um dessecador (Figura 18) para resfriar e logo após foram pesadas. Os teores de voláteis foram obtidos pela diferença entre os pesos das amostras (Equação 2), antes e após o aquecimento no Forno Mufla.

$$Tv = ((m_3 - m_4) \div m_2) \times 100\% \quad (2)$$

Onde:

Tv: Teor de voláteis, em porcentagem (%)

m_2 : massa da amostra, *in natura* (g)

m_3 : massa final da amostra, após aquecimento em Forno Mufla (g)

m_4 : massa do cadinho (g)

Figura 18 . Dessecador



.Fonte: Elaborada pelo autor

3.3.3 Determinação do teor de cinzas

Amostras moídas de aproximadamente 1g com todas as concentrações estudadas foram colocadas no forno mufla a uma temperatura de 900°C, durante 4 horas, após isso as amostras foram retiradas e resfriadas no dessecador. O teor de cinzas se deu pela Equação 3.

$$Tc = ((m_3 - m_4) \div m_2) \times 100\% \quad (3)$$

Onde:

Tc: Teor de cinzas, em porcentagem (%)

m₂: massa da amostra, *in natura* (g)

m₃: massa final da amostra, após aquecimento em Forno Mufla (g)

m₄: massa do cadinho (g)

3.3.4 Determinação do carbono fixo

Para determinar o teor de carbono fixo são necessárias informações de teor de voláteis e teor de cinzas coletadas nas análises anteriores, conforme a Equação 4.

$$Tcf = 100\% - (Tv + Tc) \quad (4)$$

Onde:

Tcf: Teor de carbono fixo, em porcentagem (%)

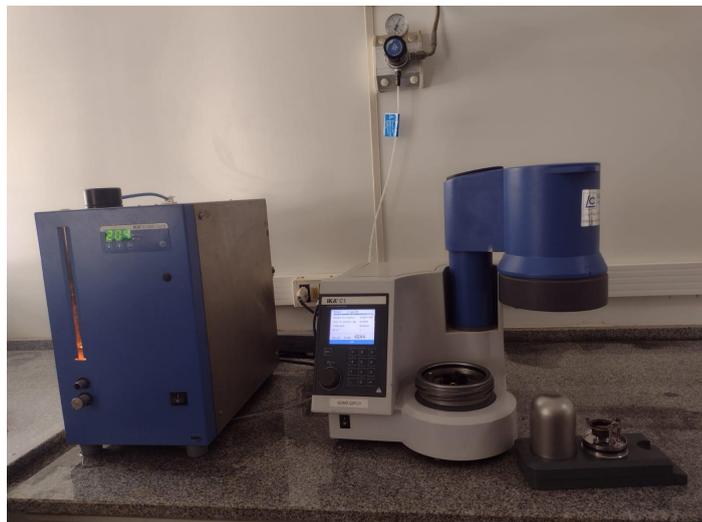
Tv: Teor de voláteis, em porcentagem (%)

Tc: Teor de cinzas, em porcentagem (%)

3.3.5 Determinação do poder calorífico superior (PCS)

A fim de determinar o Poder Calorífico Superior das amostras, amostras com aproximadamente 1g de biomassa (após procedimentos de determinação do teor de umidade) foram acondicionadas em cadinhos, e estes foram colocados em uma bomba calorimétrica (Figura 19) com injeção automática de oxigênio e circulação da água, marca IKA WORKS, modelo C-1, até o equipamento estabilizar (± 10 minutos).

Figura 19 . Bomba calorimétrica modelo.



Fonte: Elaborada pelo autor

3.4 Análise estatística

Para analisar a significância dos resultados obtidos, foi feita a análise estatística através da análise de variância (ANOVA) de fator duplo com repetições; com um grau de confiança de 95%, para verificar se os parâmetros analisados influenciaram significativamente nos resultados obtidos. A ANOVA utiliza-se do Teste F, que é a probabilidade bi-caudal de que as variâncias das amostras analisadas possuem diferenças significativas. Se o valor do $F_{\text{crítico}}$ encontrado for menor que o valor do $F_{\text{calculado}}$, significa que a variável analisada influencia significativamente no seu resultado, para o grau de confiança estabelecido. Quanto

maior for a diferença entre o $F_{calculado}$ e o $F_{crítico}$, maior a influência da variável no resultado.

A fim de determinar como essas interações são significativas e como as biomassas se comportam entre si a depender da fração de aglutinação estudada, foi utilizada também a ANOVA *Two Way*. Sendo este um dos modos de análise de variância, ANOVA *Two Way* é um teste de hipótese em que a classificação dos dados é baseada em dois fatores. Através dessa técnica é possível examinar o efeito dos dois fatores na variável dependente contínua. Também estuda a inter-relação entre variáveis independentes influenciando os valores da variável dependente, se houver.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados obtidos pelas análises laboratoriais e análises estatísticas de cada teor estudado, seguido do parecer técnico sobre o resultado final.

4.1 Teor de Umidade

O alto teor de umidade faz com que a combustão, quando comparada com a amostra seca, seja menos energética. Valores acima de 50% para o teor de umidade são determinantes para a não utilização da biomassa, pois, acima deste valor, a energia liberada é insuficiente para a combustão (KLAUTAU, 2008). Segundo Gillespie et al. (2013), a faixa ideal está entre o intervalo de 6 % a 12 % de umidade. Como mostrado na Tabela 3, 50% das médias testadas se apresentaram acima do percentual indicado. Porém, todas as amostras com 80% de carnaúba e 20% de aglutinante estavam dentro do ideal. E ainda, nenhuma das amostras apresentou umidade acima de 50%, logo aptas para utilização como fonte energética.

Tabela 3 – Média do teor de umidade das amostras (%)

		Fator B - Tipo de aglomerante		
		A. Fibra do coco verde	B. Casca da castanha de caju	C. Cavaco de cajueiro
Fator A - Concentração de aglomerante	1. 60% de carnaúba seca e 40% de aglomerante	19,70	15,03	10,53
	2. 70% de carnaúba seca e 30% de aglomerante	16,13	13,17	10,07
	3. 80% de carnaúba seca e 20% de aglomerante	10,60	9,60	8,27

Fonte: Elaborado pelo autor

Trabalhos anteriores que analisaram os valores de umidade de cada biomassa separadamente (Tabela 3) mostram que, dentre os valores de umidade encontrados, o talo da carnaúba possui o menor 9,27% (PAIXÃO, 2019). Desta forma, podemos inferir inicialmente que o talo de carnaúba deve ser usado em sua concentração máxima para que o teor de umidade seja favorável ao se utilizar as biomassas selecionadas como aglutinantes.

Tabela 4 – Referências para teor de umidade (Tu) das biomassas estudadas

Referência	Biomassa	Tu (%)
Paixão (2019)	Talo de Carnaúba	9,27
Vidal (2018)	Casca da Castanha de Caju	11,02
Ferreira <i>et al.</i> (2016)	Fibra do Coco Verde	12,08
Silva <i>et al.</i> (2015)	Cavaco de cajueiro	12,00

Fonte: Elaborado pelo autor

Através da ANOVA realizada no Excel para o teor de umidade (Tabela 5) foi possível determinar que o efeito do tipo de biomassa é significativo; o efeito da fração de biomassa é significativa; e que o efeito da interação entre esses fatores também é significativa.

Tabela 5 - ANOVA de fator duplo com repetição para Teor de Umidade (Tu)

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Concentrações	0,004623185	2	0,002311593	298,6267943	1,57024E-14	6,012904835
Aglutinantes	0,036668963	2	0,018334481	2368,569378	1,59582E-22	6,012904835
Interações	0,008465259	4	0,002116315	273,3995215	7,54304E-16	4,579035967
Dentro	0,000139333	18	7,74074E-06			
Total	0,049896741	26				

Fonte: Elaborado pelo autor

Através da técnica de hipóteses da ANOVA Two Way (Tabela 6), foi possível definir e analisar como essas interações ocorrem a depender da biomassa e a fração estudada de aglomerante. E através das informações, determinar qual a melhor combinação entre os dois fatores para o teor de umidade.

Tabela 6 – ANOVA *Two Way* para teor de umidade

Fator A - Concentração de aglutinante	
Concentração	Resultado
60% de carnaúba e 40% de aglutinante	Todas as combinações diferem entre si e o tipo de aglutinante é um fator importante. Maior média: fibra de coco verde. Menor média: casca da castanha de caju
70% de carnaúba e 30% de aglutinante	Todas as combinações diferem entre si e o tipo de aglutinante é um fator importante. Maior média: fibra de coco verde. Menor média: casca da castanha de caju
80% de carnaúba e 20% de aglutinante	Todas as combinações diferem entre si e o tipo de aglutinante é um fator importante. Maior média: fibra de coco verde. Menor média: casca da castanha de caju
Fator B - Tipo de aglomerante	
Concentração	Resultado
60% de carnaúba e 40% de aglutinante	Todas as combinações diferem entre si e o tipo de aglutinante é um fator importante. Maior média: 60% de carnaúba e 40% de aglutinante Menor média: 80% de carnaúba e 20% de aglutinante
70% de carnaúba e 30% de aglutinante	70% e 60% e 80% e 60% de carnaúba e aglutinante, respectivamente, diferem entre si. Mas 80% e 70% não diferem entre si. Maior média: 80% de carnaúba e 20% de aglutinante Menor média: 60% de carnaúba e 40% de aglutinante
80% de carnaúba e 20% de aglutinante	60% e 80% e 70% e 80% de carnaúba e aglutinante, respectivamente, diferem entre si. Mas 70% e 60% não diferem entre si. Maior média: 70% de carnaúba e 30% de aglutinante Menor média: 60% de carnaúba e 40% de aglutinante

Fonte: Elaborado pelo autor

Ao realizar a ANOVA *Two Way* foi possível verificar que para o Fator A (Concentração do aglutinante) a determinação do tipo de aglutinante é fator essencial para o teor de umidade do *blend* de carnaúba e, por ter o menor percentual, a Casca de Castanha do Caju se destaca. Para o Fator B (Tipo de aglomerante) o menor percentual encontrado foi de

6,17% de umidade em 60% Carnaúba + 40% Aglutinante. Ao observar o comportamento da ANOVA podemos inferir que ao utilizar a castanha devemos priorizar esta concentração. Caso contrário, utilizar 70% ou 80% de carnaúba será indiferente.

Com isso, através dados encontrados e as análises estatísticas realizadas, pode-se inferir que tomando como referência o teor de umidade, o *blend* escolhido seria carnaúba e casca da castanha de caju com concentrações de 80% e 20%, respectivamente.

4.2 Teor de Voláteis

Os materiais voláteis são substâncias que são desprendidas da madeira em forma de gases durante a queima. Os combustíveis que apresentam um alto teor de materiais voláteis são mais fáceis de oxidarem e queimam mais rapidamente. Embora o processo de combustão seja mais rápido, torna-se mais difícil de controlá-lo (BRITO; BARRICHELO, 2006). Como mostrado na Tabela 7, os percentuais de voláteis estão entre 70% e 90%.

Em análises estatísticas iniciais (média das amostras estudadas), se destaca o *blend* de 70% de carnaúba e 30% de casca de castanha de caju chegando a 84% de voláteis e o *blend* de 80% de carnaúba e 20% de cavaco de cajueiro chegando a 88,7%.

Tabela 7 – Média do teor de voláteis das amostras (%)

		Fator B - Tipo de aglomerante		
		A. Fibra do coco verde	B. Casca da castanha de caju	C. Cavaco de cajueiro
Fator A - Concentração de aglomerante	1. 60% de carnaúba seca e 40% de aglutinante	72,04	81,09	79,69
	2. 70% de carnaúba seca e 30% de aglutinante	73,98	84,00	81,78
	3. 80% de carnaúba seca e 20% de aglutinante	77,23	83,50	88,72

Fonte: Elaborado pelo autor

Ao comparar os valores encontrados na literatura (Tabela 8) com os percentuais de voláteis determinados neste estudo (Tabela 7), pode ser observado que houve um aumento significativo quanto a este teor.

Tabela 8 – Referências para teor de voláteis (Tv) das biomassas estudadas

Referência	Biomassa	Tv (%)
Paixão (2019)	Talo de Carnaúba	77,12
Vidal (2018)	Casca da Castanha de Caju	75,31
Ferreira <i>et al.</i> (2016)	Fibra do Coco Verde	62,48
Ponte <i>et al.</i> (2019)	Cavaco de cajueiro	70,10

Fonte: Elaborado pelo autor

Através da ANOVA realizada no Excel para o teor de voláteis (Tabela 9) foi possível determinar que o efeito do tipo de biomassa é significativo; o efeito da fração de biomassa é significativa; e que o efeito da interação entre esses fatores também é significativa. Nesta análise o valor de $F_{calculado}$ para as interações ficou mais próximo de $F_{crítico}$ do que na análise do teor de umidade.

Tabela 9 - ANOVA de fator duplo com repetição para teor de voláteis

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Concentrações	139,5388667	2	69,7694333	279,0777333	2,83528E-14	3,554557146
Aglomerantes	456,8130667	2	228,406533	913,6261333	7,99744E-19	3,554557146
Interações	50,32213333	4	12,5805333	50,32213333	1,56667E-09	2,927744173
Dentro		4,5	18	0,25		
Total	651,1740667	26				

Fonte: Elaborado pelo autor

Para entender como essas interações ocorrem a depender da biomassa e a fração estudada de aglomerante, também foi utilizada a técnica de hipóteses da ANOVA *Two Way* (Tabela 10).

Tabela 10 – ANOVA *Two Way* para teor de voláteis

Fator A - Concentração de aglutinante	
Concentração	Resultado
60% de carnaúba e 40% de aglutinante	Todas as combinações diferem entre si e o tipo de aglutinante é um fator importante. Maior média: casca da castanha de caju Menor média: fibra do coco verde.
70% de carnaúba e 30% de aglutinante	Todas as combinações diferem entre si e o tipo de aglutinante é um fator importante. Maior média: casca da castanha de caju Menor média: fibra do coco verde.
80% de carnaúba e 20% de aglutinante	Todas as combinações diferem entre si e o tipo de aglutinante é um fator importante. Maior média: fibra do coco verde. Menor média: cavaco de cajueiro
Fator B - Tipo de aglomerante	
Concentração	Resultado
60% de carnaúba e 40% de aglutinante	Todas as combinações diferem entre si e o tipo de aglutinante é um fator importante. Maior média: 80% de carnaúba e 20% de aglutinante Menor média: 60% de carnaúba e 40% de aglutinante
70% de carnaúba e 30% de aglutinante	Conclusão: 70% e 60% e 80% e 60% de carnaúba e aglutinante, respectivamente, diferem entre si. Mas 70% e 80% não diferem entre si. Maior média: 70% de carnaúba e 30% de aglutinante Menor média: 60% de carnaúba e 40% de aglutinante
80% de carnaúba e 20% de aglutinante	Todas as combinações diferem entre si e o tipo de aglutinante é um fator importante. Maior média: 80% de carnaúba e 20% de aglutinante Menor média: 60% de carnaúba e 40% de aglutinante

Fonte: Elaborado pelo autor

Ao realizar a ANOVA *Two Way* foi possível verificar que para o Fator A (Concentração do aglutinante) a determinação do tipo de aglutinante é fator essencial para o teor de voláteis do *blend* de carnaúba. E ainda, destaca-se o uso da casca da castanha de caju. Para o Fator B (Tipo de aglomerante) a determinação da fração de aglutinante com carnaúba é

fator essencial para o teor de voláteis do *blend* de carnaúba. Destaca-se o uso de 80% de carnaúba + 20% de aglomerante.

De forma geral, as espécies estudadas se mostraram aptas para geração de energia no quesito de materiais voláteis pois, foi encontrado um valor alto nesse teor, o que significa que provavelmente são bons combustíveis. Através dos dados encontrados e as análises estatísticas realizadas, podemos inferir que tomando como referência o teor de voláteis com o interesse de combustão mais rápida, o *blend* escolhido seria carnaúba e casca da castanha de caju com concentrações de 80% e 20%, respectivamente.

4.3 Teor de Cinzas

Segundo Vieira (2012), um alto teor de cinzas leva a uma diminuição da eficiência devido ao aumento do consumo de oxigênio para derreter as cinzas. Como a umidade, o teor de cinzas também interfere no poder calorífico causando perda de energia, além de prejudicar a transferência de calor (KLAUTAU, 2008). Valores elevados de cinzas, além de influenciarem negativamente no poder calorífico, podem, muitas vezes, em determinados processos de combustão, forçar a parada da produção de energia para a retirada das cinzas que são produzidas durante a queima dos briquetes.

Segundo Pincelli (2011), o teor de cinzas também ocasiona um aumento nos custos de processamento da conversão global da biomassa em energia. A Tabela 11 mostra os valores médios do teor de cinzas calculados.

Tabela 11 – Média do teor de cinzas das amostras (%)

		Fator B - Tipo de aglomerante		
		A. Fibra de coco verde	B. Casca da castanha de caju	C. Cavaco de cajueiro
Fator A - Concentração de aglomerante	1. 60% de carnaúba seca e 40% de aglutinante	7,25	5,16	5,03
	2. 70% de carnaúba seca e 30% de aglutinante	5,14	5,17	5,09
	3. 80% de carnaúba seca e 20% de aglutinante	5,12	5,16	5,12

Fonte: Elaborado pelo autor

Ao comparar os valores encontrados na literatura (Tabela 12) com os valores determinados neste trabalho (Tabela 11) é possível inferir que há uma proporção entre o teor de cinzas do *blend* estudado e a dos teores de cinzas das biomassas utilizadas como aglomerante. Com exceção do teor de cinzas da casca da castanha do caju que foi de 1,58% (VIDAL, 2018).

Tabela 12 – Referências para teor de cinzas (Tc) das biomassas estudadas

Referência	Biomassa	Tc (%)
Paixão (2019)	Talo de Carnaúba	6,47
Vidal (2018)	Casca da Castanha de Caju	1,58
Ferreira <i>et al.</i> (2016)	Fibra do Coco Verde	4,70
Ponte <i>et al.</i> (2019)	Cavaco de cajueiro	4,60

Fonte: Elaborado pelo autor

Através da ANOVA realizada no Excel para o teor de cinzas (Tabela 13) foi possível determinar que o efeito do tipo de biomassa é não significativo; o efeito da fração de biomassa não é significativa; e que o efeito da interação entre esses fatores também não é significativa.

Tabela 13 – ANOVA de fator duplo com repetição para teor de cinzas

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Concentração	2,78829	2	1,39414	0,94827	0,40593	3,55456
Aglomerante	3,10029	2	1,55014	1,05438	0,36897	3,55456
Interações	6,21242	4	1,55311	1,05639	0,40637	2,92774
Dentro	26,4636	18	1,4702			
Total	38,5646	26				

Fonte: Elaborado pelo autor

Nesta análise o valor de $F_{calculado}$ para as interações foi menor que $F_{crítico}$. Por tanto, os valores encontrados para o teor de cinzas não diferem entre si. Logo, não foi necessário analisar os dados através da ANOVA *Two Way*.

Como o aglomerante casca da castanha possui o menor teor de cinzas quando estudado separadamente, o mesmo seria o mais indicado para formar o *blend* com a carnaúba. E como visto com a ANOVA, este *blend* poderia estar em qualquer concentração, pois, esta escolha é indiferente para o processo.

4.4 Teor de Carbono Fixo

O percentual de carbono fixo presente em uma amostra demonstra a quantidade de calor gerado, sendo que quanto mais elevado for este percentual mais lentamente o combustível irá queimar (VIEIRA, 2012).

Combustíveis com altos índices de carbono fixo e com baixo índice de voláteis, normalmente queimam mais lentamente. Portanto, *blends* com alto teor de carbono fixo podem requerer longo tempo de residência no forno para queima total quando comparados com outros combustíveis que possuem baixo índice de carbono fixo. A Tabela 14 mostra os teores médios de carbono fixo encontrados neste trabalho.

Tabela 14 – Média do teor de carbono fixo das amostras (%)

		Fator B - Tipo de aglomerante		
		A. Fibra do coco verde	B. Casca da castanha de caju	C. Cavaco de cajueiro
Fator A - Concentração de aglomerante	1. 60% de carnaúba seca e 40% de aglutinante	36,01	29,89	31,27
	2. 70% de carnaúba seca e 30% de aglutinante	37,00	26,99	29,19
	3. 80% de carnaúba seca e 20% de aglutinante	33,74	27,48	22,42

Fonte: Elaborado pelo autor

Trabalhos anteriores que analisaram os valores de umidade de cada biomassa separadamente (Tabela 3) mostram que, dentre os valores de umidade encontrados, o talo da

carnaúba possui o menor com 14,89% (PAIXÃO, 2019). Desta forma, podemos inferir inicialmente que o talo de carnaúba deve ser usado em sua concentração máxima para que o teor de umidade seja favorável ao se utilizar as biomassas selecionadas como aglutinantes.

Ao comparar os percentuais da Tabela 15 com os resultados encontrados neste estudo (Tabela 14), pode ser observado que as médias, com exceção a do talo da carnaúba, convergem.

Tabela 15 – Referências para teor de carbono fixo (Tcf) das biomassas estudadas

Referência	Biomassa	Tcf (%)
Paixão (2019)	Talo de Carnaúba	14,89
Vidal (2018)	Casca da Castanha de Caju	23,11
Ferreira <i>et al.</i> (2016)	Fibra do Coco Verde	28,92
Ponte <i>et al.</i> (2019)	Cavaco de cajueiro	24,40

Fonte: Elaborado pelo autor

Através da ANOVA realizada no Excel para o teor de carbono fixo (Tabela 16) foi possível determinar que o efeito do tipo de biomassa é significativo; o efeito da fração de biomassa é significativa; e que o efeito da interação entre esses fatores também é significativa.

Tabela 16 – ANOVA de fator duplo com repetição para teor de carbono fixo

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Concentrações	96,498163	2	48,24908148	15,4259393	0,00012518	3,554557146
Aglomerantes	357,955585	2	178,9777926	57,2218263	1,5819E-08	3,554557146
Interações	63,1656148	4	15,7914037	5,04874346	0,00660258	2,927744173
Dentro	56,3002	18	3,127788889			
Total	573,919563	26				

Fonte: Elaborado pelo autor

Como $F_{calculado}$ está maior que $F_{crítico}$ na ANOVA, foi utilizada a técnica de hipóteses da ANOVA *Two Way* (Tabela 17), foi possível definir e analisar como essas interações ocorrem a depender da biomassa e a fração estudada de aglomerante. E através das informações, determinar qual a melhor combinação entre os dois fatores para o teor de carbono fixo.

Tabela 17 – ANOVA *Two Way* para teor de carbono fixo

Fator A - Concentração de aglutinante	
Concentração	Resultado
60% de carnaúba e 40% de aglutinante	A Fibra de coco verde difere do cavaco do cajueiro e da casca da castanha do caju. Mas a casca da castanha do caju não difere do cavaco do cajueiro. Maior média: fibra do coco verde Menor média: Casca da castanha de caju
70% de carnaúba e 30% de aglutinante	A Fibra de coco verde difere do cavaco do cajueiro e da casca da castanha do caju. Mas a casca da castanha do caju não difere do cavaco do cajueiro. Maior média: fibra do coco verde Menor média: Casca da castanha de caju
80% de carnaúba e 20% de aglutinante	Todas as combinações diferem entre si e o tipo de aglutinante é um fator importante. Maior média: fibra do coco verde Menor média: cavaco de cajueiro
Fator B - Tipo de aglomerante	
Concentração	Resultado
60% de carnaúba e 40% de aglutinante	Não diferem entre si e são irrelevantes para a escolha da fração de carnaúba + aglomerante. Maior média: 70% carnaúba + 30% aglomerante Menor média: 80% carnaúba + 20% de aglomerante
70% de carnaúba e 30% de aglutinante	Não diferem entre si e são irrelevantes para a escolha da fração de carnaúba + aglomerante. Maior média: 60% carnaúba + 40% aglomerante Menor média: 70% carnaúba + 30% de aglomerante
80% de carnaúba e 20% de aglutinante	Não diferem entre si e são irrelevantes para a escolha da fração de carnaúba + aglomerante. Maior média: 60% carnaúba + 40% aglomerante Menor média: 80% carnaúba + 20% de aglomerante

Fonte: Elaborado pelo autor

Ao realizar a ANOVA *Two Way* foi possível verificar que para o Fator A (Concentração do aglutinante) a determinação do tipo de aglutinante é fator essencial para o teor de carbono fixo do *blend* de carnaúba. Principalmente entre fibra de coco verde e os demais aglomerantes. E ainda, destaca-se o uso da casca da castanha de caju. Para o Fator B

(Tipo de aglomerante) a determinação da fração de aglutinante com carnaúba é não fator essencial para o teor de carbono fixo do *blend* de carnaúba. Porém, destaca-se o uso de 80% de carnaúba + 20% de aglomerante.

Com isso, através da Tabela 17 podemos inferir que os aglomerantes casca da castanha do caju e cavaco do cajueiro não diferem entre si, mas que ambos diferem da fibra do coco verde. Porém, ainda assim, destaca-se o uso da casca de castanha de caju. Já na concentração desses aglomerantes, a fração não é relevante para a determinação do *blend*. Mas ainda assim, destaca-se o uso de 80% de carnaúba e 20% de aglomerante.

4.5 Teor de Poder Calorífico Superior (PCS)

O poder calorífico é a quantidade de energia na forma de calor liberada durante a combustão de uma unidade de massa da madeira e pode ser influenciado pela umidade do material e sua constituição química. (QUIRINO, 2004). Este teor é importante para conhecer a capacidade energética da biomassa. Segundo Santos (2010), essa característica está diretamente relacionada com outros fatores, como a composição química imediata da biomassa, especialmente as porcentagens de carbono fixo e cinzas, entre outros. A Tabela 18 mostra as médias do poder calorífico superior determinados neste estudo.

Tabela 18 – Média do poder calorífico superior (PCS) das amostras [MJ/kg]

		Fator B - Tipo de aglomerante		
		A. Fibra de coco verde	B. Casca da castanha de caju	C. Cavaco de cajueiro
Fator A - Concentração de aglomerante	1. 60% de carnaúba seca e 40% de aglutinante	17,0402	19,0457	16,6383
	2. 70% de carnaúba seca e 30% de aglutinante	17,0277	18,8070	17,3124
	3. 80% de carnaúba seca e 20% de aglutinante	17,1114	17,9529	17,4128

Fonte: Elaborado pelo autor

Como mencionado anteriormente, o PCS é definido como a quantidade de energia liberada durante a transferência de calor, desse modo quanto mais energia é liberada, melhor a eficiência do processo. O maior poder calorífico superior encontrado neste estudo foi com

60% de carnaúba + 40% de casca da castanha. Na literatura pesquisada o maior valor encontrado foi o da fibra do coco verde com 18,67 [MJ/kg]. Porém, como o seu teor de umidade é elevado, o seu potencial de queima é menor que os demais.

Também é possível inferir que o PCS do talo de carnaúba é potencializado pelo aglomerante escolhido. Segundo Paixão (2019) o PCS do talo é 16,55[MJ/kg] (Tabela 18). Ao compararmos este teor com o maior teor encontrado neste trabalho, 19,0457 [MJ/kg] com 60% de carnaúba e 40% de castanha, o aumento do PCS deste *blend* foi de aproximadamente 13%.

Tabela 19 – Referências para poder calorífico superior (PCS) das biomassas estudadas

Referência	Biomassa	PCS [MJ/kg]
Paixão (2019)	Talo de Carnaúba	16,55
Vidal (2018)	Casca da Castanha de Caju	18,26
Ferreira <i>et al.</i> (2016)	Fibra do Coco Verde	18,67
Ponte <i>et al.</i> (2019)	Cavaco de cajueiro	17,40

Fonte: Elaborado pelo autor

Através da ANOVA realizada no Excel para teor de poder calorífico (Tabela 20) foi possível determinar que o efeito do tipo de biomassa é significativo; o efeito da fração de biomassa não é significativa; e que o efeito da interação entre esses fatores também não é significativa. Estas informações foram verificadas através do valor $F_{calculado}$ e $F_{crítico}$.

Tabela 20 – ANOVA de fator duplo com repetição para poder calorífico superior (PCS)

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Concentrações	13181,16667	2	6590,583333	0,339370438	0,71667816	3,554557146
Aglutinantes	782555,1667	2	391277,5833	20,14814746	2,55084E-05	3,554557146
Interações	161362,3333	4	40340,58333	2,077267025	0,126214432	2,927744173
Dentro	349560,5	18	19420,02778			
Total	1306659,167	26				

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 21 – ANOVA *Two Way* para poder calorífico superior (PCS)

Fator A - Concentração de aglutinante	
Concentração	Resultado
60% de carnaúba e 40% de aglutinante	Casca da castanha de caju difere de fibra de coco verde e cavaco de cajueiro. Mas fibra de coco verde e cavaco de cajueiro não diferem entre si. Maior média: Casca de Castanha de Cajueiro Menor média: Cavaco de Cajueiro
70% de carnaúba e 30% de aglutinante	Casca de castanha de caju difere de fibra de coco verde e cavaco de cajueiro. Mas fibra de coco verde e cavaco de cajueiro não diferem entre si. Maior média: Casca de Castanha de Cajueiro Menor média: fibra de coco verde
80% de carnaúba e 20% de aglutinante	Não diferem entre si e são irrelevantes para a escolha da fração de carnaúba + aglomerante. Maior média: Casca da castanha de caju Menor média: fibra de coco verde
Fator B - Tipo de aglomerante	
Concentração	Resultado
60% de carnaúba e 40% de aglutinante	Não diferem entre si e são irrelevantes para a escolha da fração de carnaúba + aglomerante. Maior média: 80% carnaúba + 20% aglomerante Menor média: 70% carnaúba + 30% de aglomerante
70% de carnaúba e 30% de aglutinante	60% e 70% de carnaúba não diferem entre si. Mas 60% e 80% diferem entre si. Maior média: 70% carnaúba + 30% aglomerante Menor média: 80% carnaúba + 20% de aglomerante
80% de carnaúba e 20% de aglutinante	Não diferem entre si e são irrelevantes para a escolha da fração de carnaúba + aglomerante. Maior média: 80% carnaúba + 20% aglomerante Menor média: 70% carnaúba + 30% de aglomerante

Fonte: Elaborado pelo autor

Ao realizar a ANOVA *Two Way* (Tabela 21) foi possível verificar que para o Fator A (Concentração do aglutinante) a determinação do tipo de aglutinante é fator essencial para o teor de carbono fixo do *blend* de carnaúba. As biomassas diferem entre si, principalmente entre fibra de coco verde e os demais aglomerantes. E ainda, destaca-se o uso da casca da

castanha de caju. Para o Fator B (Tipo de aglomerante) a determinação da fração de aglutinante com carnaúba é fator essencial para o teor de carbono fixo do *blend* de carnaúba. Porém, destaca-se o uso de 70% de carnaúba + 30% de aglomerante.

4.6 Parecer técnico

Diante dos resultados compilados das análises realizadas nesse trabalho (Tabela 21) , bem como dos comparativos demonstrados nos gráficos de 1 a 5, o *blend* que melhor proporciona eficiência energética para combustão em indústrias é o *blend* de 80% carnaúba + 20% casca da castanha de caju.

Neste sentido, para os produtores rurais que trabalham com a carnaúba, o mais indicado seria beneficiar (triturar e compactar) o talo da carnaúba com casca de castanha do caju, pois, além de comercializarem um produto de maior qualidade, ainda conseguiriam obter mais vantagens quanto a compactação do mesmo.

Tabela 22 – Resultados das análises

Parâmetro	Concentração de biomassa e aglomerante	Tipo de Aglomerante
Teor de Umidade	80% de carnaúba + 20% de aglomerante	Casca da castanha de caju
Teor de Voláteis	80% de carnaúba + 20% de aglomerante	Casca da castanha de caju
Teor de Cinzas	Escolha indiferente ao processo	Casca da castanha de caju
Teor de Carbono Fixo	80% de carnaúba + 20% de aglomerante	Casca da castanha de caju ou Cavaco de cajueiro
Poder Calorífico Superior	70% de carnaúba + 30% de aglomerante	Casca da castanha de caju

Fonte: Elaborado pelo autor

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com os resultados obtidos através das análises de biomassa oriundas do talo de carnaúba, fibra do coco verde, casca da castanha de caju e cavaco do cajueiro, constatou-se que as quatro possuem potencial energético para a utilização como fonte de energia. E ainda, como já era esperado, que o *blend* de carnaúba com as demais também possui bom potencial de combustão.

A casca de castanha é a biomassa mais indicada para a utilização do *blend* de carnaúba como combustível sólido. A composição de 80% de carnaúba e 20% de casca da castanha de caju apresentou teor de umidade de 9,60%, teor de voláteis de 83,50%, teor de cinzas de 5,16%, teor de carbono fixo de 27,58% e poder calorífico superior de 19,04 [MJ/kg], sendo este o maior deste estudo. Seus dados não obtiveram a melhor média em todos os parâmetros, porém, quando analisada a interação entre as biomassas estudadas em suas respectivas concentrações, esta combinação foi a que melhor se apresentou.

Quando se compara os resultados obtidos pela fibra de coco verde e o cavaco de cajueiro, constata-se que o alto teor de umidade (19,70%), o baixo teor de voláteis (72,04%), o alto teor de cinzas (7,25%) associado ao alto teor de carbono fixo (36,01%) e baixo PCS (17,04 MJ/kg) torna a fibra de coco verde menos indicada ao uso no *blend*. Em contrapartida, o cavaco de cajueiro poderia substituir a casca de castanha de caju sem prejuízos ao fator energético.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Com o intuito de desenvolver novos estudos, assim como propor a continuação ou aplicação do presente trabalho, seguem sugestões para trabalhos futuros:

- Análise com base nas propriedades mecânicas do material selecionado já compactado;
- Comparativo entre o material compactado e briquetado, seja em análise imediata e/ou em propriedades mecânicas;
- Estudo de novos materiais aglutinantes para compactação e/ou briquetagem de talo de Carnaúba;
- Utilização de análise elementar;
- Avaliação do comportamento da biomassa selecionada no coprocessamento e no forno industrial.

REFERÊNCIAS

AÇMA, H. H. **Combustion characteristics of different biomass materials.** *Energy Conversion e Management*. Istambul: pergamon, v. 44, p. 155-162, 2003.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas da energia elétrica.** 2008. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap4.pdf>. Acesso em: 01 jan. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas da energia elétrica.** 2015 Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap4.pdf>. Acesso em: 01 jan. 2022.

AGRONEGÓCIOS e tecnologias. *Gazeta Mercantil*, 24 maio 2006, p. A-3.

ALVES, M.O.; COELHO, J.D. **Tecnologia e relações sociais de produção no extrativismo da carnaúba no nordeste brasileiro.** In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL, 44., 2006, Fortaleza. Anais Fortaleza: Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural, 2006. 9p. 1 CD-ROM.

BENÍCIO, E. L., Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, **Utilização de resíduo celulósico na composição de briquetes de finos de carvão vegetal.** 2011.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. **Comportamentos isolados da lignina e da celulose da madeira frente à carbonização.** Piracicaba: ESALQ, 2006. 4 p. (Circular Técnica, 28).

CARVALHO, José Natanael Fontenele de. **Pobreza, Emprego e Renda na Economia da Carnaúba.** 02. ed. Fortaleza: REN, 2009. 40 v.

DANTAS, A. N. S. **Estudo de novos parâmetros para aprimoramento do controle de qualidade da cera de carnaúba.** 2014. Tese (Doutorado em Química)– Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

ELIAS, Juliana. **Preço do petróleo já subiu 60% em 2021 – e há quem aposte em mais aumentos.** CNN Brasil Business, 2021. Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/business/preco-do-petroleo-ja-subiu-60-em-2021-e-ha-quem-a-poste-em-mais-aumentos/>>. Acesso em: 01 de jan. de 2022.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **BEN Interativo.** Disponível em:<<http://shinyepe.brazilsouth.cloudapp.azure.com:3838/ben/>> Acesso em: 01 de jan. de 2022.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2021 – Relatório Síntese: Ano Base 2020.** Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em:<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-588/BEN_S%C3%ADntese_2021_PT.pdf> Acesso em: 01 de jan. de 2022.

FERREIRA, C. S. NUNES, J. A. R., GOMES, R. L. F. **Manejo de corte das folhas de Copernicia prunifera (Miller) H. E. Moore no Piauí.** Revista Caatinga, v.26, n.2, p.25-30, 2013.

FERREIRA, A. F. B. *et al.* **CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DA FIBRA DA CASCA DO COCO COM POSTERIOR PRODUÇÃO DE BRIQUETE.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 21., 2016, Fortaleza. Anais. Fortaleza, Ceará: Cobeq, 2016. v. 21, p. 56-64.

FONTES, P.J.P. de; QUIRINO, W.F. PASTORE JUNIOR, F.; FILGUEIRAS, S.M.S. **Aglutinante para briquetagem de carvão vegetal.** Brasília: DPQ/IBDF, 1984.

GILLESPIE, G. D. *et al.* **Prediction of quality parameters of biomass pellets from proximate and ultimate analysis.** Fuel, v. 111, n. Supplement C, p. 771 – 777, 2013. ISSN 0016-2361. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001623611300402X>>. Acesso em: 05 de jan. de 2022.

GOLDEMBERG, José. **Energias renováveis: um futuro sustentável.** Revista USP, São Paulo, v. 72, n. 2, p. 6-15, fev. 2007. Trimestral.

GONÇALVES, Maria da Penha Moreira *et al.* **Desenvolvimento em campo de espécies da Caatinga com o uso de resíduo de carnaúba.** Brazilian Journal Of Development Brazil. Curitiba, p. 1188-1200. 09 jan. 2020.

KLAUTAU, J. V. P. **Análise Experimental de uma Fornalha a lenha de Fluxo Concorrente para Secagem de Grãos.** 2008. Dissertação (mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) PPGERHA, UFPR. Curitiba: 2008.

MACEDO, L. A. (2012). **Influência da composição da biomassa no rendimento em condensáveis do processo de torrefação.** Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais, Publicação PPGEFL.DM - 189/2012, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 49p.

MACHADO, M. P. O. (2015). **Quantificação de resíduos do processamento de cinco espécies comerciais amazônicas e análise do potencial energético.** Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais, Publicação PPGEFL.DM – 247/2015, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 58p.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balço energético nacional – BEN 2021. Ano base 2010:** Rio de Janeiro, EPE, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-588/BEN_S%C3%ADntese_2021_PT.pdf>. Acesso em 01 de jan. de 2022.

MONTGOMERY, D.e. **Design and Analysis of Experiments.** New York: John Wiley and Sons, 1991.

NOGUEIRA, L. A. H., LORA, E. E., 2002, **Wood Energy: Principles and Applications**. Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica Distribuída – NEST, do Instituto de Engenharia Mecânica – IEM, Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI.

OLIVEIRA, K. C.; ZANIN, V. **A Bioeconomia e os Biocombustíveis no cenário Brasileiro**. Revista iPecege 1(2): 23-43, 2015.

PACHECO, F. **Energias renováveis: breves conceitos**. 2006.

PAIXÃO, Raul Lima. **BAGANA E TALO DE CARNAÚBA COMO MATÉRIA-PRIMA PARA COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS**. 2019. 48 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

PINCELLI, A.L.P.S.; BRITO, J.O.; CORRENTE, J.E. **Avaliação da termorretificação sobre colagem na madeira de Eucalyptus saligna e Pinus caribaeavar hondurensis**. Scientia Forestalis, Piracicaba, n. 61, p. 122-132, jun. 2011.

PONTE, M. R. **Blendas de bagaço de cana-de-açúcar: Caracterização das propriedades e investigação da viabilidade técnica**. 2017. Monografia (Engenharia de Energias) – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Acarape, 2017.

PONTE, M.R.; GADELHA, A.M.T.; MACHADO, Y.L., et al. **Blendas de bagaço de cana-de-açúcar, podas de mangueira e cajueiro: caracterização das propriedades e investigação de seus potenciais energéticos**. Revista Matéria, v.24, n.2, 2019.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A.C.O; PIMENTA, A. S.; CASTRO, R. V. O.; MARINHO, I. V.; TRUGILHO, P. F.; ALVES, I. C. N.; CASTRO, A. F. N. M. **POTENCIAL ENERGÉTICO DA MADEIRA DE ESPÉCIES ORIUNDAS DE PLANO DE MANEJO FLORESTAL NO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE**. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 23, n. 2, p. 493-504, abr.-jun., 2013.

SILVA, D. A., YAMAJI, M. F., BARROS, J. L., et al. **Caracterização de Biomassas para a Briquetagem**. Floresta, v. 45, n. 4, pp.713-722, 9 set. 2015.

TABACHNICK, B. G.; FIDELL, L. S.; OSTERLIND, S. J. **Using multivariate statistics**. New York: Pearson, 2001.

TAVARES, Silvio Roberto de Lucena; TAVARES, Marília Amaral de Moura Estevão. **PERSPECTIVAS PARA A PARTICIPAÇÃO DO BRASIL NO MERCADO INTERNACIONAL DE PELLETS**. Holos, [S.L.], v. 5, p. 292, 1 out. 2015. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN). <http://dx.doi.org/10.15628/holos.2015.2662>.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Biblioteca Universitária. **Guia de normalização de trabalhos acadêmicos da Universidade Federal do Ceará**. Fortaleza: Biblioteca Universitária, 2013. Disponível em: <https://biblioteca.ufc.br/wp-content/uploads/2019/10/guia-de-citacao-06.10.2019.pdf>. Acesso em: 07 dez. 2021.

VIDAL, A. C. F; HORA, A. B. **Perspectivas do setor de biomassa de madeira para geração de energia.** BNDES Setorial, Rio de Janeiro, v. 33, p. 261-314, 2011.

VIDAL, Mariana de Souza. **Estudo do potencial energético de briquetes produzidos a partir de resíduos agrícolas de casca de castanha de caju e bagaço de cana-de-açúcar.** 2018. 37 f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

VIEIRA, A. C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas para geração de energia.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, UNIOESTE, 2012.

WERTHER J.; SAENGER, M.; HARTGE, E. U.; OGADA, T.; SIAGI, Z. Combustion of agricultural residues. **Progress in energy and combustion science.** Alemanha: Pergamon, v.26, p. 1-27, 2000.

WISE, S. L. **Applied statistics-analysis of variance and regression.** Journal of Educational Statistics. [S.l.], v. 15, n. 2, p. 175-178, 1990.

YOKOYAMA, S.; MATSUMURA, Y. (eds). **The Asian Biomass Handbook – A guide for biomass production and utilization.** The Japan Institute of Energy, 326 p., 2008.

APÊNDICE A - TESTE ANOVA FEITO NO EXCEL PARA TEOR DE UMIDADE

Anova: fator duplo com repetição						
RESUMO	Coco	Casca da Cas	Cavaco de caj	Total		
<i>60% carnaúba + 40% aglomerante</i>						
Contagem	3	3	3	9		
Soma	59,1	18,5	28,3	105,9		
Média	19,7	6,1666667	9,43333333	11,7666667		
Variância	0,39	0,0433333	0,01333333	37,515		
<i>70% carnaúba + 30% aglomerante</i>						
Contagem	3	3	3	9		
Soma	48,4	20,9	29	98,3		
Média	16,13333333	6,9666667	9,66666667	10,9222222		
Variância	0,003333333	0,0433333	0,06333333	16,6694444		
<i>80% carnaúba + 20% aglomerante</i>						
Contagem	3	3	3	9		
Soma	31,8	21,3	24,9	78		
Média	10,6	7,1	8,3	8,66666667		
Variância	0,09	0,04	0,01	2,4075		
<i>Total</i>						
Contagem	9	9	9			
Soma	139,3	60,7	82,2			
Média	15,47777778	6,7444444	9,13333333			
Variância	15,88944444	0,2227778	0,4225			
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Amostra	46,23185185	2	23,1159259	298,626794	1,5702E-14	3,554557146
Colunas	366,6896296	2	183,344815	2368,56938	1,5958E-22	3,554557146
Interações	84,65259259	4	21,1631481	273,399522	7,543E-16	2,927744173
Dentro	1,393333333	18	0,07740741			
Total	498,9674074	26				

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE B - TESTE ANOVA FEITO NO EXCEL PARA TEOR DE VOLÁTEIS

Anova: fator duplo com repetição						
RESUMO	Coco	Casca da Casta Cavaco de cajue	Total			
<i>60% carnaúba + 40% aglomerante</i>						
Contagem	3	3	3	9		
Soma	216,12	243,27	249,07	708,46		
Média	72,04	81,09	83,02333333	78,71777778		
Variância	0,25	0,25	38,58333333	35,55506944		
<i>70% carnaúba + 30% aglomerante</i>						
Contagem	3	3	3	9		
Soma	221,94	252	245,34	719,28		
Média	73,98	84	81,78	79,92		
Variância	0,25	0,25	0,25	20,9586		
<i>80% carnaúba + 20% aglomerante</i>						
Contagem	3	3	3	9		
Soma	231,69	250,5	265,66	747,85		
Média	77,23	83,5	88,55333333	83,09444444		
Variância	0,25	0,25	0,33333333	24,34170278		
<i>Total</i>						
Contagem	9	9	9			
Soma	669,75	745,77	760,07			
Média	74,41666667	82,86333333	84,45222222			
Variância	5,345275	2,003275	19,54226944			
ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Amostra	92,03294074	2	46,01647037	10,18397295	0,001100869	3,554557146
Colunas	523,749363	2	261,8746815	57,95587213	1,43247E-08	3,554557146
Interações	41,76028148	4	10,44007037	2,310507377	0,09729866	2,927744173
Dentro	81,33333333	18	4,518518519			
Total	738,8759185	26				

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE C- TESTE ANOVA FEITO NO EXCEL PARA TEOR DE CINZAS

Anova: fator duplo com repetição					
RESUMO	Coco	Casca da Castanha	Cavaco de cajueiro		
60% carnaúba + 40% aglomerante					
Contagem	3	3	3		
Soma	21,75	15,48	15,1		
Média	7,25	5,16	5,033333333		
Variância	13,2301	0	0,000133333		
70% carnaúba + 30% aglomerante					
Contagem	3	3	3		
Soma	15,43	15,53	15,27		
Média	5,143333	5,176666667	5,09		
Variância	3,33E-05	0,000433333	0,0004		
80% carnaúba + 20% aglomerante					
Contagem	3	3	3		
Soma	15,35	15,47	15,34		
Média	5,116667	5,156666667	5,113333333		
Variância	3,33E-05	0,000133333	0,000533333		
Total					
Contagem	9	9	9		
Soma	52,53	46,48	45,71		
Média	5,836667	5,164444444	5,078888889		
Variância	4,431275	0,000227778	0,001536111		
ANOVA					
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	valor-P	F crítico
Concentração	2,788289	2	1,394144444	0,405934	3,554557
Agglomerante	3,100289	2	1,550144444	0,368966	3,554557
Interações	6,212422	4	1,553105556	0,406371	2,927744
Dentro	26,4636	18	1,4702		
Total	38,5646	26			

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE D - TESTE ANOVA FEITO NO EXCEL PARA TEOR DE CARBONO FIXO

Anova: fator duplo com repetição						
RESUMO	Coco	Casca da	Cavaco de cajueiro	Total		
<i>60% carnaúba</i>						
+						
<i>40% aglomerante</i>						
Contagem	3	3	3	9		
Soma	108,02	89,67	93,81	291,5		
Média	36,00666667	29,89	31,27	32,38888889		
Variância	26,06333333	0,25	0,25	14,36008611		
<i>70% carnaúba</i>						
+						
<i>30% aglomerante</i>						
Contagem	3	3	3	9		
Soma	111	80,95	87,57	279,52		
Média	37	26,9833	29,19	31,05777778		
Variância	0,25	0,25003	0,25	20,96239444		
<i>80% carnaúba</i>						
+						
<i>20% aglomerante</i>						
Contagem	3	3	3	9		
Soma	101,24	82,44	67,26	250,94		
Média	33,74666667	27,48	22,42	27,88222222		
Variância	0,250033333	0,25	0,3367	24,35519444		
<i>Total</i>						
Contagem	9	9	9			
Soma	320,26	253,06	248,64			
Média	35,58444444	28,1178	27,62666667			
Variância	8,725652778	2,00044	16,2694			
ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Concentrações	96,49816296	2	48,24908148	15,42593928	0,000125176	3,554557146
Aglomerantes	357,9555852	2	178,9777926	57,22182633	1,58188E-08	3,554557146
Interações	63,16561481	4	15,7914037	5,048743462	0,006602582	2,927744173
Dentro	56,3002	18	3,127788889			
Total	573,919563	26				

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE E - TESTE ANOVA FEITO NO EXCEL PARA PODER CALORÍFICO

Anova: fator duplo com repetição

RESUMO	Coco	Casca da Castan	Castanç Cavaco de cajue	Total
<i>60% carnaúba</i>				
+				
<i>40% aglomerante</i>				
Contagem	3	3	3	9
Soma	12210	13647	11922	37779
Média	4070	4549	3974	4197,666667
Variância	30976	37525	2209	88837,75

<i>70% carnaúba</i>				
+				
<i>30% aglomerante</i>				
Contagem	3	3	3	9
Soma	12201	13476	12406,5	38083,5
Média	4067	4492	4135,5	4231,5
Variância	196	67824	5112,25	57334,25

<i>80% carnaúba</i>				
+				
<i>20% aglomerante</i>				
Contagem	3	3	3	9
Soma	12261	12864	12477	37602
Média	4087	4288	4159	4178
Variância	29617	25	1296	15512,75

<i>Total</i>				
Contagem	9	9	9	
Soma	36672	39987	36805,5	
Média	4074,666667	4443	4089,5	
Variância	15284,5	40466,75	9761,75	

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Concentrações	13181,16667	2	6590,583333	0,339370438	0,71667816	3,554557146
Aglutinantes	782555,1667	2	391277,5833	20,14814746	2,55084E-05	3,554557146
Interações	161362,3333	4	40340,58333	2,077267025	0,126214432	2,927744173
Dentro	349560,5	18	19420,02778			
Total	1306659,167	26				

Fonte: Elaborado pelo autor