



CAROÇO DE AÇAÍ: UMA ALTERNATIVA BIOENERGÉTICA

TAHARE FERREIRA E SILVA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

JUNHO 2021



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

CAROÇO DE AÇAÍ: UMA ALTERNATIVA BIOENERGÉTICA

TAHARE FERREIRA E SILVA

ORIENTADOR: PROF. DR. AILTON TEIXEIRA DO VALE

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

PPGEFL.DM –23/06/2021

BRASÍLIA – DF

JUNHO DE 2021

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL
CAROÇO DE AÇAÍ: UMA ALTERNATIVA

TAHARE FERREIRA E SILVA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS, DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:

Prof. Dr. Ailton Teixeira do Vale – Orientador

Departamento de Engenharia Florestal – UnB

Prof. Dr. Alexandre Florian da Costa – Examinador Interno

Departamento de Engenharia Florestal – UnB

Dra. Lucélia Alves de Macedo – Examinadora Externa

Serviço Florestal Brasileiro (SFB)/ Laboratório de Produtos Florestais (LPF)

Prof. Dr. Joaquim Carlos Gonzalez – Examinador Suplente

Departamento de Engenharia Florestal – UnB

Dr. Divino Eterno Teixeira – Examinador Suplente

Serviço Florestal Brasileiro (SFB)/ Laboratório de Produtos Florestais (LPF)

Brasília, 23 de Junho de 2021.

Fc Ferreira e Silva, Tahare
CAROÇO DE AÇAÍ: UMA ALTERNATIVA BIOENERGÉTICA / Tahare
Ferreira e Silva; orientador Ailton Teixeira do Vale. --
Brasília, 2021.
66 p.

Dissertação (Mestrado - Mestrado em Ciências Florestais)
- Universidade de Brasília, 2021.

1. Torrefação. 2. Carvão. 3. Açaizeiro. 4. Bioenergia. 5.
Pirólise. I. Teixeira do Vale, Ailton, orient. II. Título.

Aos meus tios Carlos Ferreira, Vânia Ferreira e Ivan Rosa
E ao meu amigo João Anacleto,
“A razão por que a despedida nos dói tanto é que nossas almas estão ligadas”.
Noah Calhoun

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Dr. Ailton Teixeira do Vale, por toda atenção, dedicação, paciência e ensinamentos compartilhados nesses dois anos.

Ao Laboratório de Produtos Florestais do Serviço Florestal Brasileiro por todo o suporte. Aos membros do Laboratório de Energia da Biomassa do LPF: Bruno, Gustavo, Lucélia e Greg, por todo o suporte, atenção e dedicação, em especial ao Bruno que me acompanhou rotineiramente ao longo de todo o mestrado e me ofereceu toda ajuda e apoio.

Aos professores, técnicos e amigos do Departamento de Engenharia Florestal da UnB pelas ideias, informações e conhecimentos.

À minha esposa Isabela, pelo incentivo, apoio e amor que sempre me dão forças.

À minha mãe, Tania, minha principal motivadora desde sempre, quem esteve comigo em todos os momentos e sempre acreditou e se orgulhou de mim.

Ao meu pai, Ivo, mesmo com a distância incentivou e me apoiou ao longo dessa caminhada.

Às minhas tias e avós por emanarem toda a força e apoio.

Aos meus filhos pet, Léo, Gal, Manu e Olga, por todo carinho, bagunças e amor.

Às minhas amigas pela paciência, apoio e conselhos.

Por fim, agradeço imensamente a CAPES pela bolsa concedida e a todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa.

RESUMO

Para agregar valor à cadeia produtiva do açaí tem-se como alternativa sustentável a produção de energia a partir do seu caroço contribuindo para as diferentes possibilidades de uso do material em questão. Neste sentido o objetivo principal deste trabalho foi a caracterização energética do caroço de açaí (*Euterpe oleracea Mart.*) sob três condições: *in natura*, torreficado e carbonizado. As amostras foram coletadas em um mercado de rua da cidade de Belém no Pará e destinadas a ensaios de caracterização física e energética do material *in natura*, torreficado e carbonizado, sendo: medição das densidades sólida aparente, densidade do granel, densidade energética, determinação do teor de umidade, poder calorífico e análise química imediata. Os ensaios de torrefação do material foram realizados a uma temperatura final de 220°C com patamar de 60 min. A carbonização foi realizada num patamar de 180 min de duração a 450°C. Os valores de análise imediata e poder calorífico obtidos a partir dos três tratamentos realizados encontram-se dentro dos intervalos descritos na literatura. Houve um aumento na densidade energética do granel do material dos tratamentos de torrefação e carbonização de 42,61% e 47,05%, respectivamente, quando comparados ao material *in natura* a 18,47% de TU. O caroço de açaí na condição *in natura*, torreficado ou transformado em carvão vegetal apresenta excelentes qualidades para uso como insumo energético.

Palavras-chave: Torrefação, Carvão, Açaizeiro, Bioenergia, Pirólise, Poder Calorífico

ABSTRACT

To add value to the açai production chain, the sustainable alternative is the production of energy from its core, contributing to the different possibilities of using the material in question. The main purpose of this essay is the energetic characterization of the açai seed (*Euterpe oleracea Mart.*) under three conditions: *in natura*, torrefied and charcoal. The samples were collected in a street market in the city of Belém in Pará, and destined to physical and energetic characterization tests in three conditions: *in natura*, torrefied and charcoal material. Regarding the tests performed, it was evaluated the measurement of the apparent solid densities, density of the bulk, energy density, humidity content determination, calorific value and immediate chemical analysis. The torrefaction tests of the material were carried out at a final temperature level of 60 min. at 220° C. The carbonization was carried out at a 180-minute level at 450° C. The values of immediate analysis and power obtained from the three treatments carried out are within the intervals described in the scientific literature of the topic. There was an increase in the energy density of the material from the torrefied and carbonization treatments of 42,61% and 47,05%, respectively, when compared to the *in natura* material. The açai seed in its natural conditions, torrefied or transformed into charcoal has excellent qualities for use as an energy input.

Palavras-chave: Torrefaction, Charcoal, Açazeiro, Bioenergy, Pyrolysis, Energy content

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO.....	16
2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1. Biomassa para Geração de Energia	18
2.2 Açai.....	18
2.3 Caracterização Físico-Energética	20
2.3.1 Teor de Umidade	20
2.3.2 Densidade Sólida Aparente e Granel.....	20
2.3.3 Poder Calorífico.....	20
2.3.4 Análise Imediata	21
2.3.5 Densidade Energética	22
2.4 Torrefação.....	23
2.5 Carbonização	23
3.MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
3.1 Preparação das Amostras.....	24
3.1.1 Preparação e Separação das Amostras.....	24
3.1.2 Preparação das amostras caracterização energética e tratamentos térmicos	25
3.2 Protocolos dos Tratamentos.....	27
3.2.1 Torrefação.....	27
3.2.2 Carbonização	28
3.3 Caracterização física dos produtos sólidos.....	30
3.3.1 Densidade do granel	31
3.3.2 Densidade sólida.....	32
3.3.3 Teor de Umidade (base seca).....	32
3.4 Caracterização Energética dos Produtos	33

3.4.1 Preparação das amostras	33
3.4.2 Análise imediata	33
3.4.3 Poder calorífico.....	34
3.4.4 Densidade Energética	36
3.4.5 Rendimento Gravimétrico	36
3.5 Delineamento.....	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1 Torrefação.....	38
4.2 Carbonização	42
4.3 Propriedades Físicas e Energéticas.....	48
4.3.1 Densidade Sólida Aparente e Teor de Umidade.....	48
4.3.2 Densidade do Granel	50
4.3.3 Análise imediata	52
4.3.4 Poder Calorífico.....	54
4.3.5 Densidade Energética	55
CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição química do caroço do açaí.	19
Tabela 2. Valores médios de densidade sólida aparente, teste da razão de verossimilhança de Scott-Knott e coeficiente de variação dos caroços de açaí em seus três tratamentos.	49
Tabela 3. Valores médios de densidade do granel, teste da razão de verossimilhança de Scott-Knott e coeficiente de variação dos caroços de açaí em seus três tratamentos.	51
Tabela 4. Valores médios de análise imediata, teste da razão de verossimilhança de Scott-Knott e coeficiente de variação dos caroços de açaí em seus três tratamentos.	52
Tabela 5. Poder calorífico superior (PCS), inferior (PCI) e útil (PCU), e seus respectivos coeficientes de variação.	55
Tabela 6. Densidade energética do granel do caroço de açaí.	56
Tabela 7. Densidade energética sólida aparente do caroço de açaí.	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Caroços de Açaí.	25
Figura 2. Caroços de açaí separados em quatro tratamentos com quatro repetições cada.	25
Figura 3. Prensa hidráulica de bancada marca Specac 15 T e moinho universal M20 marca Ika, respectivamente.	26
Figura 4. Amostras moídas em moinho universal para determinação da análise imediata e poder calorífico. 1 – In natura, 2 – torrificado, 3 – carbonizado.	26
Figura 5. Sistema de torrefação adaptado de Silveira <i>et al.</i> (2017). Fonte: CHAVES (2020). 1. Painel de Controle, 2. Computador, 3. Gás Nitrogênio, 4. Balança de precisão, 5. Analisadores de gás, 6. Forno de Torrefação, 7. Pedestal da balança com amostras, 8. Fonte de calor por resistências elétricas e termopar, 9. Conversor Analógico/Digital.	27
Figura 6. Forno de torrefação e amostras acondicionadas em uma bandeja telada de aço inox, respectivamente.	28
Figura 7. Reator de carbonização.	29
Figura 8. Alcatrão vegetal produzido durante a carbonização.	30
Figura 9. Bico de Bunsen queimando os gases não condensáveis.	30
Figura 10. Ensaio de determinação da densidade do granel.	32
Figura 11. Ensaio de densidade sólida: determinação do volume por deslocamento de água, baseado no princípio de Arquimedes.	32
Figura 12. Forno-mufla utilizado para o ensaio de material volátil.	34
Figura 13. Peletes confeccionados a frio para ensaio de PCS.	35
Figura 14. Bomba calorimétrica utilizada para determinação do Poder Calorífico.	36
Figura 15. Caroço de Açaí torrificado.	39
Figura 16. Carvão de caroço de Açaí.	42
Figura 17. Caroços de açaí <i>in natura</i>	50
Figura 18. Caroços de açaí em três condições. 1 – <i>In natura</i> , 2 – torrificado, 3 – carbonizado.	51

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Perfil termogravimétrico das torrefações e curva média de rendimento gravimétrico. TDm: temperatura definida média. TPm: temperatura do processo média. RGM: rendimento gravimétrico médio.....	39
Gráfico 2. Rendimento gravimétrico sólido em base seca do caroço de açaí torreficado.	40
Gráfico 3. Rendimento em carbono fixo para caroço de açaí torreficado.....	41
Gráfico 4. Média móvel da derivada da perda de massa média, temperatura média processo e temperatura definida. TDm: temperatura definida. TPm: temperatura média do processo. dPM: derivada da perda de massa média.	41
Gráfico 5. Perfis de temperaturas das carbonizações das amostras de caroço de açaí e curva média. TPm: temperatura na fronteira da amostra com a fonte de calor. TDm: temperatura definida. TA: temperatura da amostra correspondente (1,2,3 e 4). TAM: temperatura média das amostras.....	43
Gráfico 6. Perfil térmico com derivada da temperatura interna para a carbonização do caroço de açaí.	44
Gráfico 7. Rendimento gravimétrico líquido em base seca do caroço de açaí.....	45
Gráfico 8. Rendimento gravimétrico sólido em base seca do caroço de açaí.	46
Gráfico 9. Rendimento gravimétrico gasoso em base seca do caroço de açaí.	47
Gráfico 10. Rendimentos gravimétricos do caroço de açaí em quatro ensaios.	47
Gráfico 11. Rendimento gravimétrico em carbono fixo do carvão de caroço de açaí. ...	48
Gráfico 12. Teor de material volátil (MV), teor de cinzas (Cinzas) e teor de carbono fixo (CF) do caroço de açaí em seus respectivos tratamentos.	52

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

°C – Graus Celsius
ANOVA – Análise de variância
CF - Teor de carbono fixo
COPANT - Comissão Panamericana de Normas Técnicas
CV – Coeficiente de variação
Cz - Teor de cinzas
De - Densidade energética
DG - Densidade do granel
dPM - Derivada da perda de massa
dT_a – Derivada da temperatura da amostra no tempo
g – Gramas (massa)
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ISO - Organização Internacional de Normalização
kg – Quilogramas
kN – Quilonewtons
LPF - Laboratório de Produtos Florestais
m – Metros
M - milhões
m³ – Metros cúbicos
min - Minutos
mm - Milímetro
MME - Ministério de Minas e Energia
MV - Teor de Material Volátil
NBR - Norma brasileira
PAM - Produção Agrícola Municipal
PCI – Poder calorífico inferior
PCS – Poder calorífico superior
PEVS - Produção da Extração Vegetal e Silvicultura
PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos
RCF - rendimento gravimétrico em carbono fixo
RGG - Rendimento gravimétrico gasoso
RGL - Rendimento gravimétrico líquido

RGm - rendimento gravimétrico médio

RGs- Rendimento gravimétrico sólido

SFB – Serviço Florestal Brasileiro

SI - Sistema Internacional de unidades

Ta – Temperatura da amostra

Td – Temperatura definida

Tdm - Temperatura definida média

Tp – Temperatura do processo

Tpm - Temperatura do processo média

TU - Teor de umidade

UnB – Universidade de Brasília

1. INTRODUÇÃO

As preocupações com o aquecimento global e o esgotamento dos combustíveis fósseis têm impulsionado a busca por fontes alternativas de energia. Entre tais fontes, a biomassa apresenta um grande potencial de crescimento nos próximos anos, de acordo com os estudos de planejamento do Ministério de Minas e Energia (MME).

As energias renováveis participam da matriz energética nacional e são consideradas energias alternativas viáveis para a diversificação da matriz energética do país pelo seu menor impacto ambiental (MAGALHÃES, 2007). Segundo LORENZO (1994) a eficiência energética e a redução no consumo, assim, como, o suprimento futuro da demanda energética, deverão ser baseados nas fontes renováveis de energia, constituindo-se no fundamento da matriz energética mundial. No Brasil a matriz energética apresenta-se como uma das mais limpas, com valores em torno de 45% de participação dos combustíveis renováveis segundo o Balanço Energético Nacional (2019).

A biomassa é a quarta fonte de energia do mundo, representando aproximadamente 14% do consumo mundial de energia final. Neste contexto as biomassas vegetais destacam-se pela facilidade de obtenção, principalmente num país tropical como o Brasil, seja pela cultura de espécies arbóreas ou pela produção de resíduos a partir das culturas agrícolas e por permitir a obtenção de biocombustíveis sólidos, líquidos e gasosos. Os exemplos de biomassa mais utilizados para a produção de energia e biocombustíveis são: resíduos florestais, resíduos de indústrias madeireiras, resíduos agrícolas (colheita, processamento), resíduo de esgoto e reflorestamentos (WELFLE, 2017).

Com vastas áreas de cultivo agrícola, o Brasil é um grande produtor de resíduos de biomassa vegetal. Por sua grande extensão territorial, apresenta um alto potencial de recursos naturais geradores de energia que poderiam minimizar o suprimento das fontes energéticas convencionais, destacando-se, entre elas, a eólica, solar, as pequenas quedas d'água e a biomassa (LORENZO, 1994). Como exemplo de altos níveis de produção agrícola e florestal tem-se o estado do Pará onde em 2016, de acordo com dados da Produção Agrícola Municipal – PAM, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2017), foram gerados 10,4 M de toneladas de resíduos, demonstrando o potencial que o Estado tem para produção de energia a partir desses resíduos.

Um dos principais produtos responsáveis pelo alto índice de resíduos gerados

no estado do Pará é o fruto do açaí. Segundo dados da Produção da Extração Vegetal e Silvicultura (PEVS) do IBGE, a produção de açaí no estado do Pará, o maior produtor nacional, foi de cerca de 151.793,00 toneladas em 2019, contemplando 68,15% da produção brasileira. Cerca de 83% da produção total é resíduo (caroço), gerado após o processamento do fruto para a produção de polpa. O caroço é geralmente descartado a céu aberto, apresentando risco de dano ambiental pela destinação incorreta desse resíduo.

Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS os resíduos devem ter uma destinação, ambientalmente, adequada através de processos de reciclagem, compostagem, recuperação, aproveitamento energético ou outras utilizações, que evitem danos ou riscos à saúde pública e à segurança e minimizem os impactos ambientais adversos (BRASIL, 2012).

Os caroços de açaí são considerados resíduos de atividade comercial, logo sua coleta e destinação são responsabilidade de seu gerador, no caso os batedores (Lei nº 12.305/2010). A destinação deveria ser realizada buscando práticas de consumo sustentável, ou seja, reutilização de resíduos e adequação quanto à disposição final de rejeitos (BRASIL, 2012).

Para agregar valor à cadeia produtiva do açaí e reduzir os impactos ambientais provenientes do descarte inadequado deste resíduo, tem-se como alternativa sustentável a produção de energia a partir do caroço de açaí.

A utilização energética desses resíduos apresenta grandes vantagens, como contribuição para a matriz energética, ampliação na geração de renda, diminuição dos gases de efeito estufa, diminuição dos volumes de resíduos depositados em aterros sanitários e, conseqüentemente, redução de custos (QUIRINO, 2003). A partir desse reaproveitamento, SILVA *et al.* (2004) afirmaram que este resíduo pode ser transformado em um biocombustível considerado como um “pellet natural” em função de seu formato e características energéticas, podendo ser utilizado na geração de energia para os mais diversos fins.

Um dos primeiros passos a ser dado no sentido de utilização de uma biomassa para geração de energia é a sua caracterização energética. A caracterização da composição química, física e mecânica é de grande importância, pois vai determinar a sua qualidade e a partir daí sua utilização de forma mais eficiente e produtiva, através de um viés de agregação de valor econômico contribuindo para as diferentes possibilidades de uso do material em questão. Diversos trabalhos tratam sobre o caroço

de açaí na sua condição *in natura*, porém há uma lacuna a respeito da caracterização energética do caroço de açaí em sua condição natural e tratado termicamente.

Neste sentido, o objetivo principal deste trabalho foi a caracterização energética do caroço de açaí sob três condições: *in natura*, torrificada e carbonizada.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Biomassa para Geração de Energia

As energias renováveis compõem a matriz energética tradicional e são consideradas energias alternativas pelo seu menor impacto ambiental (MAGALHÃES, 2007). Segundo LORENZO (1994) a eficiência energética e a redução no consumo, assim, como, o suprimento futuro da demanda energética, deverão ser baseados nas fontes renováveis de energia, constituindo-se no fundamento da matriz energética mundial. O Brasil, por sua vasta extensão territorial, apresenta um alto potencial de recursos naturais geradores de energia que poderiam minimizar o suprimento das fontes energéticas convencionais, destacando-se, entre elas, a eólica, solar, as pequenas quedas d'água e a biomassa (LORENZO, 1994).

Do ponto de vista energético, os níveis de consumo crescentes, levarão a uma exaustão das fontes fósseis. Por outro lado, o descarte inadequado de resíduos oriundo de insumos agroflorestais tem efeito direto no meio ambiente com reflexos indiscutíveis na saúde pública. Neste sentido, se faz necessária a tomada de iniciativas em relação ao seu uso e destinação final (LUCZYNSKI, 2006).

A biomassa abrange a matéria vegetal criada pela fotossíntese e seus derivados, tais como resíduos florestais e agrícolas, a matéria animal e a matéria orgânica contida em resíduos domésticos urbanos (LORA, 1997). A biomassa pode ser definida, como a massa total da matéria orgânica que se acumula em um espaço vital, pertencendo a ela todas as plantas e todos os animais, incluindo seus resíduos e pode ser encontrada na natureza em diversas formas, as mais conhecidas sendo a lenha, os resíduos gerados pelas culturas agrícolas, as agroindústrias, a criação animal, as florestas energéticas e os resíduos sólidos urbanos (STAISS;PEREIRA, 2001).

2.2 Açaí

De acordo com HOMMA *et al.* (2006) o açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) é nativo da Amazônia brasileira, símbolo do Estado do Pará que se apresenta como o

mais importante centro de dispersão natural dessa palmácea. Pertencente à família *Arecaceae*, que engloba, aproximadamente, 200 gêneros e cerca de 2600 espécies, sua distribuição é predominantemente nas áreas tropicais e subtropicais (JONES, 1995). Há duas variedades do fruto, o preto (ou roxo) predominante e consumido em grande escala pela população e o verde, que possui uma polpa clara, e é utilizado na produção do açaí branco, consumido em menor escala e pouco encontrando no mercado paraense (ALVES; VASCONCELOS, 2006).

O caroço do açaí é rico em carbono, é gerado após o processamento do fruto para a produção da polpa e descartado muitas vezes em locais inadequados por não haver uma utilização apropriada (SILVA, 2014) e uma destinação economicamente viável para a população. O tipo de destinação desses resíduos varia significativamente, desde o uso para fins artesanais, como essências e elementos decorativos, até a exploração energética (BRANDÃO; BARROS, 2015).

O caroço é uma semente formada por um pequeno endosperma sólido ligado a um tegumento, que na maturidade é rico em celulose (53,20%), hemicelulose (12,26%) e lignina (22,30%) (RODRÍGUEZ-ZÚÑIGA *et al.*, 2008) e que mesmo após a remoção da polpa ainda apresenta elevados teores de celulose e hemicelulose (ALTMAN, 1956). A composição química (Tabela 1) do caroço do açaí é muito importante para o processo de transformação energética, pois indica fatores importantes como o teor de umidade, a concentração de lignina e celulose.

Tabela 1. Composição química do caroço do açaí.

Umidade	13,60%
Extrato Estéreo	3,01%
Extrato Alcoólico	9,32%
Extrato Aquoso	2,80%
Proteínas Brutas	4,34%
Hemicelulose	12,26%
Celulose	34,41%
Lignina	7,72%
Cinzas	1,34%

Fonte: ALTMAN, 1956.

O caroço também é utilizado nas indústrias de cerâmica, como insumo energético para gerar calor nos fornos que utilizam combustão de biomassa florestal para produzir telhas e tijolos (CARNEIRO *et al.*, 2013). Além dessas utilidades

mencionadas, o caroço de açaí está se destacando devido seu potencial energético, ou seja, como uma fonte de biomassa para gerar energia alternativa na Amazônia. Esse uso, que poderia potencialmente suprir a demanda energética de comunidades isoladas presentes no estuário amazônico ainda necessita de mais estudos, voltados principalmente para o aprimoramento das tecnologias utilizadas no processo de geração de energia a partir do caroço de açaí.

2.3 Caracterização Físico-Energética

2.3.1 Teor de Umidade

NOGUEIRA (2007) definiu o teor de umidade como a quantidade de água contida na biomassa em relação a sua massa seca ou úmida. FOELKEL (2016) estabeleceu que quanto maior o teor de umidade, maior será a perda de energia da biomassa. Desta forma, o teor de umidade influencia a capacidade da biomassa de gerar energia térmica, ou poder calorífico, sendo inversamente proporcional, ou seja, quanto maior o teor de umidade, menor o poder calorífico. Segundo LIMA *et al.* (2008), quando a biomassa é utilizada para geração de energia, a umidade influencia negativamente na quantidade de calor liberado durante a queima, diminuindo a eficiência energética. Durante a queima, parte da energia liberada é utilizada para evaporar a água relativa ao teor de umidade, diminuindo o poder calorífico útil.

2.3.2 Densidade Sólida Aparente e Granel

A densidade é uma propriedade que relaciona a massa de um material com o seu volume, ou seja, define a quantidade de massa de uma substância contida por unidade de volume.

Densidade a granel é definida como a razão entre a massa do resíduo e o volume ocupado pelo mesmo com os poros e os vazios existentes entre as partículas dos resíduos quando estes são colocados formando uma camada (PÉREZ *et al.*, 2016).

2.3.3 Poder Calorífico

Se tratando da possibilidade da utilização de resíduos de biomassa como

combustíveis em substituição às principais fontes de energia hoje utilizadas, a propriedade de maior importância consiste no poder calorífico desses produtos. O poder calorífico determina o valor energético da matéria e segundo JARA (1989) é definido como a quantidade de energia liberada em forma de calor durante a combustão de uma unidade de massa da madeira, à pressão constante (PERA, 1990).

De acordo com PERA (1990) e NOGUEIRA (2005a), o poder calorífico pode ser apresentado de duas formas distintas: poder calorífico superior e inferior. O poder calorífico superior (PCS), é a soma da energia liberada pelo combustível considerado com a energia gasta para a vaporização da água que forma durante a combustão. Onde, a combustão se efetua a volume constante e no qual a água formada durante a combustão é condensada e o calor que é derivado desta condensação é recuperado (BRIANE; DOAT, 1985). E o poder calorífico inferior (PCI) é obtido sem levar em consideração o calor latente do vapor da água, representa a energia líquida liberada em forma de calor que o combustível tem capacidade de fornecer. A água gerada é perdida sob forma de vapor pelo sistema, levando consigo uma parte da energia liberada pelo material, sendo o calor latente do vapor da água (PIMENTA *et al.*, 2000).

Segundo PETROFF; DOAT (1978), o carvão vegetal apresenta maior poder calorífico quando comparado ao mesmo material na condição *in natura* devido ao aumento na concentração de carbono fixo.

2.3.4 Análise Imediata

A composição química da biomassa é representada pelos materiais voláteis, carbono fixo e cinzas. Os materiais voláteis compreendem os gases combustíveis e não combustíveis como: oxigênio, nitrogênio, metano, monóxido de carbono e hidrogênio. Esses materiais possuem característica de se volatilizarem rapidamente o que contribui de forma positiva para as suas propriedades energéticas. Encontram-se nos combustíveis sólidos em quantidade que varia entre 76 e 86%, sendo responsável por grande parte do calor gerado na combustão (MORAIS *et al.*, 2004). Porcentagens acima de 80% facilitam a ignição do material e também sua queima (WERTHER *et al.*, 2000).

O carbono fixo é a fração do material que se queima em estado sólido, sendo composto principalmente por carbono, mas possui outros elementos como oxigênio, hidrogênio, nitrogênio e enxofre. Tais elementos quando presentes em grande

quantidade nos combustíveis resultam em uma queima mais lenta. Portanto, implica em um maior tempo de residência nos aparelhos de queima, sendo desejável sua maior quantidade a fim de obter uma melhor qualidade, do ponto de vista energético do material (OLIVEIRA *et al.*, 2010). Os minerais são constituintes inorgânicos e não participam do processo de combustão da biomassa, consistindo num resíduo após a queima, conhecido como cinza (BRAND, 2010). As cinzas constituem um parâmetro importante para a madeira e biomassas, pois seu teor afeta negativamente o poder calorífico dos materiais lignocelulósicos e podem causar danos nas estruturas dos queimadores e aumentar a frequência de limpeza destes (NEVES *et al.*, 2013).

Quanto aos processos termoquímicos, segundo CARMO (1988), o teor de materiais voláteis é influenciado pela temperatura de carbonização, taxa de aquecimento e composição química da biomassa, sendo a temperatura o principal parâmetro que regula os teores de materiais voláteis e carbono fixo do carvão. Dessa forma, com o aumento da temperatura, a biomassa passa a sofrer transformações através da eliminação maciça de produtos voláteis, e uma crescente concentração de material mais resistente à ação do calor (carbono fixo) no produto sólido residual (BRITO, 1992). Contudo, com o aumento da temperatura final de carbonização ocorre o aumento do teor de carbono fixo do carvão vegetal o qual é acompanhado pela redução concomitante do teor de materiais voláteis, rendimento e perda de resistência do mesmo (CARNEIRO, *et al.*, 2013).

2.3.5 Densidade Energética

Segundo PINHEIRO *et al.* (2005), a propriedade que resume as características físicas e químicas da biomassa é a densidade energética, que avalia o desempenho da biomassa como combustível, e é definida como o produto entre o poder calorífico e a densidade.

A densidade energética é uma importante propriedade para a análise energética de combustíveis sólidos, pois considera a quantidade de energia armazenada em um determinado volume de material. A baixa densidade energética da biomassa em relação ao petróleo e ao carvão mineral, implica em altos custos de transporte e armazenamento (COUTO *et al.* 2004) e nesse sentido, o uso de tratamentos térmicos são fundamentais para o aumento do uso da biomassa como fonte energética.

2.4 Torrefação

A torrefação se apresenta como um dos tratamentos térmicos aplicados a diversas variedades de biomassa, submetidas a temperaturas geralmente entre 200 e 300°C (PRINS *et al.* 2006), esse tipo de tratamento promove a degradação de polímeros de celuloses, hemiceluloses e lignina. Tal tratamento é caracterizado pela escassez de agentes oxidantes durante o processo, portanto é considerada uma fase intermediária entre a biomassa *in natura* e o carvão vegetal (RODRIGUES, 2009).

A finalidade da torrefação é concentrar a energia da biomassa em um produto formado em curto tempo, utilizando baixas taxas de aquecimento e temperaturas moderadas, permitindo reter os voláteis de maior poder calorífico no próprio produto. (BRIANE; DOAT, 1985; SANTOS, 2015). As propriedades da biomassa torrada variam em função do tempo e da temperatura do processo, e para cada combinação dessas variáveis pode-se obter produtos de diferentes propriedades energéticas.

O rendimento da conversão do material torreficado varia entre 60% e 80%, a depender das condições de temperatura em que o processo é realizado (FONSECA, 2004). BOURGOIS (1985) caracteriza o material submetido à torrefação como sendo um produto com alta densidade energética, hidrofóbico e friável. RODRIGUES (2009) acrescenta que o material torreficado apresenta um aumento da resistência a ataques biológicos e da estabilidade dimensional e diminuição das propriedades mecânicas.

2.5 Carbonização

A carbonização tem como objetivo principal a concentração de carbono, com a eliminação da maior quantidade possível de oxigênio e hidrogênio através do tratamento térmico sob elevadas temperaturas.

O carvão vegetal é formado a partir do processo de carbonização ou pirólise lenta da biomassa. Consiste no seu aquecimento, a temperaturas entre 350°C e 500°C, promovendo a degradação térmica na ausência de agente oxidante ou na sua presença controlada, promovendo modificações dos seus componentes químicos, cujo objetivo é aumentar o teor de carbono na massa resultante do processo, o carvão vegetal (CARNEIRO *et al.*, 2011).

Durante o processo de carbonização da biomassa, o carvão é apenas uma fração dos

produtos que podem ser obtidos, e se utilizando sistemas apropriados para a coleta, também podem ser aproveitados os condensados pirolenhosos (líquido pirolenhoso) e os gases não condensáveis (COUTO *et al.*, 2004). A proporção de obtenção desses subprodutos depende do método de carbonização utilizado e dos diferentes parâmetros de reação (BEENACKERS; BRIDGWATER, 1989).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os caroços de açaí (*Euterpe oleracea Mart.*) foram coletados com batedores da polpa do fruto no Mercado Ver-o-Peso, localizado na cidade de Belém - PA. As características energéticas do material foram analisadas em três condições: in natura, torreficado e carvão vegetal. Os ensaios dividiram-se entre o Laboratório de Energia da Biomassa do Laboratório de Produtos Florestais – LPF/ Serviço Florestal Brasileiro – SFB, Laboratório de Tecnologia da Madeira – LTM e Laboratório de Energia da Biomassa – LEB do Departamento de Engenharia Florestal – EFL da Universidade de Brasília – UnB.

3.1 Preparação das Amostras

3.1.1 Preparação e Separação das Amostras

Os caroços foram encaminhados para o Laboratório de Tecnologia da Madeira e lavados em água corrente para a retirada de possíveis resíduos e posteriormente secos ao ar livre apenas para a retirada da água superficial e para evitar a germinação dos mesmos enquanto armazenados.

Os caroços foram distribuídos em uma mesa de madeira (Figura 1) e selecionados por quartejamento em quatro tratamentos com quatro repetições cada (Figura 2) e embalados em embalagens plásticas para não haver ganho ou perda de umidade.

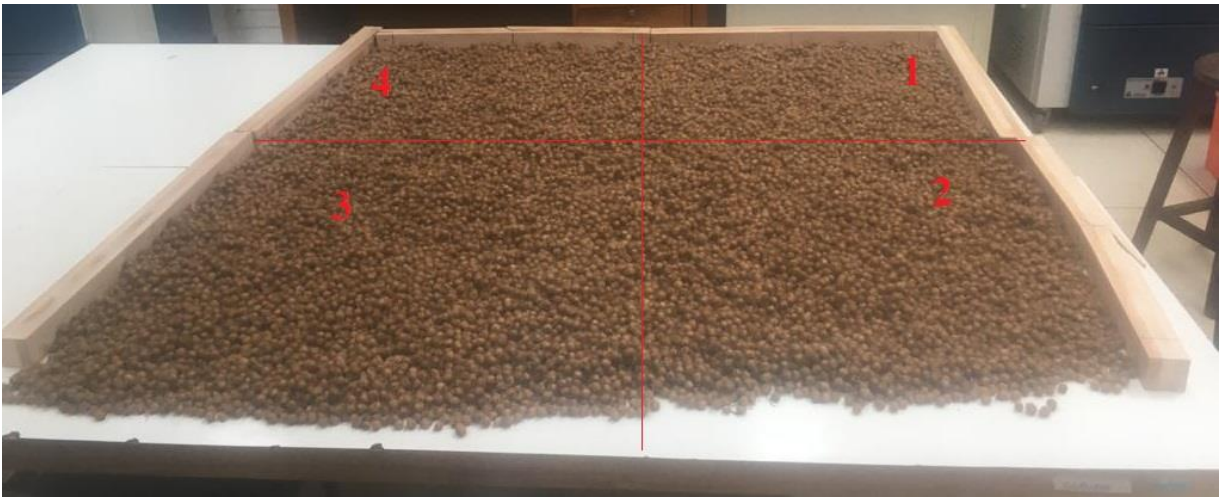


Figura 1. Caroços de Açáí.



Figura 2. Caroços de açáí separados em quatro tratamentos com quatro repetições cada.

3.1.2 Preparação das amostras caracterização energética e tratamentos térmicos

As amostras foram destinadas a ensaios de caracterização física e energética do material *in natura*, bem como para ensaios de torrefação e carbonização, cujos produtos sólidos foram posteriormente submetidos à mesma caracterização. Os ensaios consistiram em: medição das densidades sólida aparente, densidade do granel, densidade energética, determinação do teor de umidade, poder calorífico e análise imediata (teores de cinzas, matérias voláteis e carbono fixo).

Para os ensaios de poder calorífico e análise imediata, as amostras foram maceradas em uma prensa hidráulica de bancada (Figura 3). Após a quebra dos caroços na prensa, eles foram triturados em um moinho universal com lâminas de aço (Figura 3). Após a trituração, as amostras foram peneiradas para que se obtivesse uma fração de granulometria das amostras entre 0,149 mm e 0,595 mm (Figura 4).



Figura 3. Prensa hidráulica de bancada marca Specac 15 T e moinho universal M20 marca Ika, respectivamente.



Figura 4. Amostras moídas em moinho universal para determinação da análise imediata

e poder calorífico. 1 – In natura, 2 – torreficado, 3 – carbonizado.

3.2 Protocolos dos Tratamentos

3.2.1 Torrefação

Os ensaios de torrefação do material foram realizados conforme protocolo determinado pelo LPF, em reator microcontrolado, à taxa de 5°C/min. com secagem de 60 min. a 105°C e patamar de temperatura final de 60 min. a 220°C, tendo seu resfriamento realizado dentro do próprio forno até cerca de 100°C. Após a torrefação, todo o material foi acondicionado em embalagem plástica. No presente estudo, devido à baixa temperatura adotada, não foi necessário utilizar atmosfera inerte, não havendo, portanto, injeção de gás nitrogênio.

Conforme descrito por CHAVES (2020), o reator de torrefação (Figura 5) é uma adaptação do reator de SILVEIRA *et al.* (2017), que consiste no monitoramento em tempo real da temperatura do processo e da massa da amostra. O sistema de torrefação possibilita a construção de gráficos de análise termogravimétrica a partir da relação dos dados gerados em tempo real durante o ensaio. As amostras foram acondicionadas em uma bandeja de tela de aço inox e colocadas sob o pedestal da balança analítica de precisão de capacidade 1.000 g e resolução 0,001 g, localizada no interior do forno de torrefação (Figura 6).

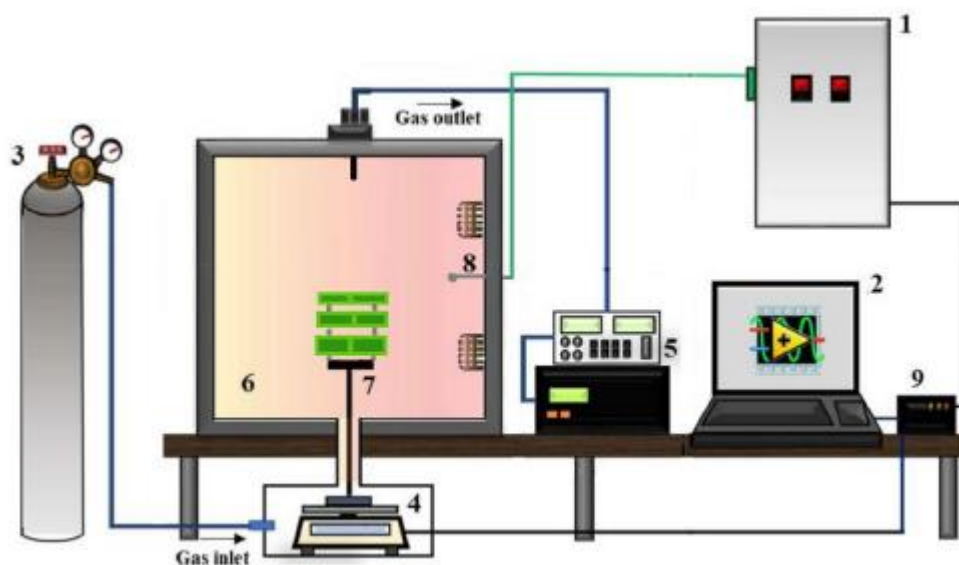


Figura 5. Sistema de torrefação adaptado de Silveira et al. (2017). Fonte: CHAVES (2020). 1. Painel de Controle, 2. Computador, 3. Gás Nitrogênio, 4. Balança de precisão, 5. Analisadores de gás, 6. Forno de Torrefação, 7. Pedestal da balança com amostras, 8. Fonte

de calor por resistências elétricas e termopar, 9. Conversor Analógico/Digital.



Figura 6. Forno de torrefação e amostras acondicionadas em uma bandeja telada de aço inox, respectivamente.

3.2.2 Carbonização

O ensaio de carbonização foi desenvolvido no LPF e realizado conforme CHAVES (2020) em um reator microcontrolado, com uma taxa de aquecimento de $3,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ num patamar de 180 min de duração a 450°C , finalizando com resfriamento até atingir uma temperatura abaixo dos 100°C , para o ensaio em questão as amostras foram carbonizadas ainda úmidas, não houve secagem prévia. Ao final da carbonização as amostras foram armazenadas em embalagens plásticas.

O reator possui uma capacidade total de 20 litros de amostra, com termopares para monitorar as temperaturas do processo em dois pontos, o primeiro no limite entre a amostra e a fonte de calor e o segundo no centro da amostra. Esse monitoramento permite a construção de gráficos para análise do perfil térmico do processo CHAVES (2020).



Figura 7. Reator de carbonização.

Os gases condensáveis emitidos são recolhidos em um recipiente que é conectado a um sistema de refrigeração no escapamento do reator que permite a recuperação do produto líquido, denominado alcatrão vegetal (Figura 8). O gás que não é condensado passa por um bico de Bunsen, onde é possível sua queima (Figura 9).



Figura 8. Alcatrão vegetal produzido durante a carbonização.



Figura 9. Bico de Bunsen queimando os gases não condensáveis.

3.3 Caracterização física dos produtos sólidos

Foram determinados os teores de umidade, densidades sólida aparente, densidade sólida aparente seca a 0% de umidade, densidade do granel e densidade do granel seco a 0% de umidade. As densidades a 0% de teor de umidade foram determinadas apenas para a condição *in natura*.

3.3.1 Densidade do granel

A densidade do granel foi mensurada, conforme Equação 1, em uma única condição de umidade (umidade de equilíbrio) para cada tratamento, exceto para a condição *in natura* onde a densidade do granel foi determinada também após a secagem a 0 % de teor de umidade do material.

$$(1) DG = \frac{Mg}{Vg}$$

Onde:

DG = densidade do granel (kg/m³);

Mg = massa do granel (kg);

Vg = volume do granel em umidade de equilíbrio (cm³).

O volume do granel foi determinado utilizando-se um cilindro de acrílico com diâmetro de 15 cm e massa conhecida. Os caroços foram colocados dentro do cilindro e a altura atingida foi medida. Em seguida, determinou-se a massa de açaí, que foi obtida em uma balança com sensibilidade de 0,01g.

Para o cálculo do volume do granel foi utilizado a Equação 2.

$$(2) Vc = \pi * r^2 * h$$

Onde:

Vc = Volume de açaí (m³);

r = raio interno do cilindro (m);

h = altura alcançada pelo açaí (m).



Figura 10. Ensaio de determinação da densidade do granel.

3.3.2 Densidade sólida

A densidade sólida foi mensurada em duas condições de umidade para a condição *in natura*: a primeira em umidade que o material se encontrava após secagem ao ar livre e em condição seca a 0% de umidade em estufa ventilada a $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Para o ensaio de densidade sólida, as amostras consistiam em dez caroços de cada um dos tratamentos (*in natura*, torrefação e carbonização). A determinação da densidade foi baseada no método de deslocamento de água (princípio de Arquimedes) com adaptações no aparato desenvolvido no Laboratório de Energia da Biomassa – UnB para a inserção do caroço de açaí no béquer contendo 500 ml de água (Figura 11).

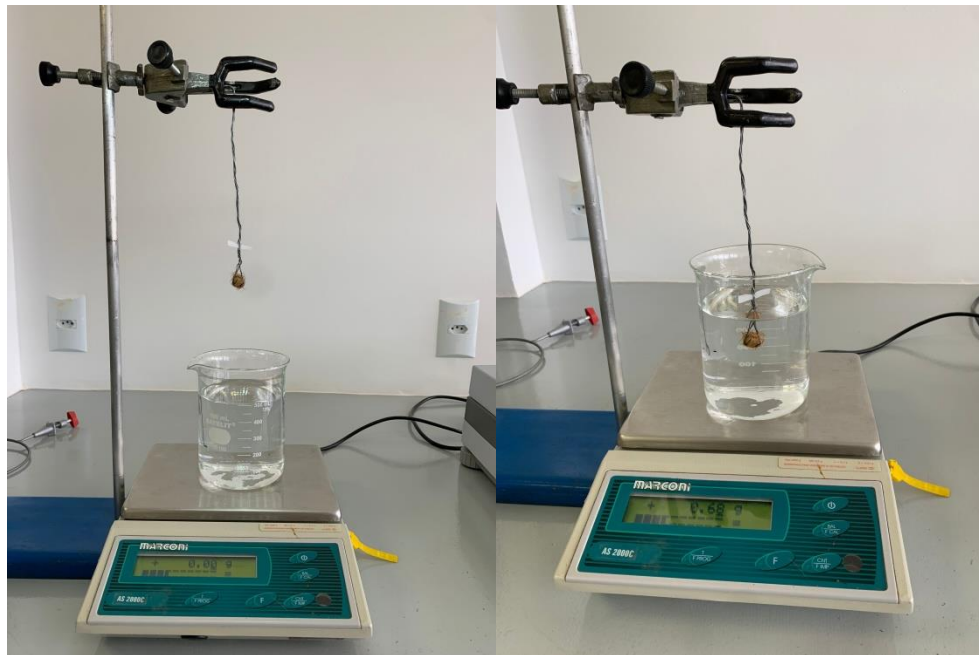


Figura 11. Ensaio de densidade sólida: determinação do volume por deslocamento de água, baseado no princípio de Arquimedes.

3.3.3 Teor de Umidade (base seca)

O teor de umidade (TU) foi determinado baseando-se na norma COPANT 460, que se fundamenta na medição da massa úmida (M_1) e da massa seca (M_2), em gramas (g) do material, coletado após secagem em estufa a $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$ durante 24 h. O teor de umidade foi determinado pela Equação 3:

$$(3) TU (\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_2} \times 100$$

3.4 Caracterização Energética dos Produtos

3.4.1 Preparação das amostras

As amostras para caracterização energética dos produtos *in natura*, torreficado e carbonizado foram trituradas e posteriormente peneiradas conforme descrito no item 3.1.2 para os ensaios de análise imediata, poder calorífico superior e densidade energética.

3.4.2 Análise imediata

A análise imediata é um método de determinação do percentual de massa de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas. O teor de cinzas (Cz) foi mensurado em base seca de acordo com a norma ISO 18122 em equipamento termogravimétrico automático TGA-2000A, que queimou as amostras a 550°C em atmosfera de oxigênio a 99,5 % de pureza até estabilização final da massa da amostra. O teor de material volátil (MV) foi mensurado em base seca conforme a norma ISO 18123 por meio de ensaio manual em forno-mufla a 900°C por 7 minutos (Figura 12) e determinado a partir da Equação 4. O teor de carbono fixo (CF) foi calculado em base seca conforme Equação 5.

$$(4) MV (\%) = \frac{M_2 - M_3}{M} \times 100$$

Onde:

M = massa da amostra (g);

M₂ = massa cadinho + amostra (g);

M₃ = massa cadinho + amostra após mufla a 900°C (g).

$$(5) CF \% = 100\% - (Cz \% + MV \%)$$

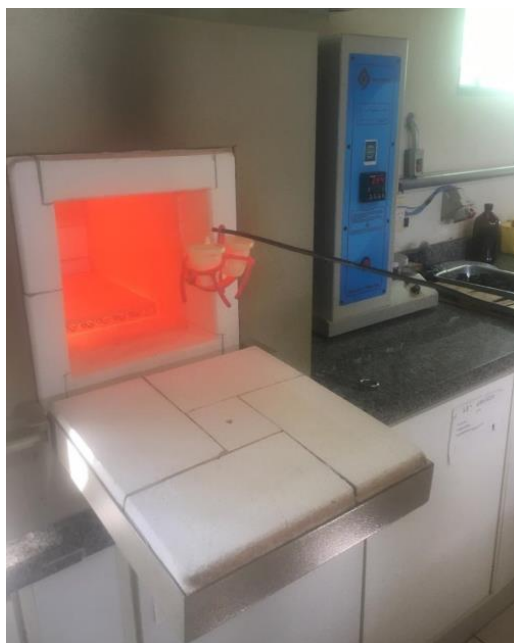


Figura 12. Forno-mufla utilizado para o ensaio de material volátil.

3.4.3 Poder calorífico

O poder calorífico superior (PCS) foi determinado conforme a norma NBR 8633/1984 em calorímetro isoperibol automático, baseado no método de Berttelot, que consiste na combustão do material em um ambiente fechado na presença de oxigênio e sob pressão. Os tratamentos *in natura* e torrefação foram queimados na forma de pellet (Figura 13) prensado a frio em prensa de bancada à 19,6 kN/cm² a partir do material moído em partículas de 0,149 mm a 0,595 mm.



Figura 13. Peletes confeccionados a frio para ensaio de PCS.

O poder calorífico inferior (PCI) foi obtido sem levar em consideração o calor latente do vapor da água, e foi calculado conforme a Equação 6, que se baseia no PCS e desconta as perdas de energia devido à evaporação da água formada pela combustão dos átomos de hidrogênio que compõem quimicamente o material.

Os teores de hidrogênio considerados para o cálculo foram de 6% (ROWELL, 2005) para o material *in natura*, 5,5% para o material torreficado (DOAT, 1985) e 3,5% (WENZL, 1970) para o caroço carbonizado.

$$(6) \text{ PCI} = \text{PCS} - 600 * \left(\frac{9 * H}{100} \right)$$

Onde:

PCS = poder calorífico superior;

H = Teor de hidrogênio percentual em base seca.

O poder calorífico útil (PCU), considera as perdas de energia devido à evaporação da água formada pela combustão do hidrogênio e as perdas decorrentes da evaporação da umidade do material, e foi calculado conforme a Equação 7. Para os tratamentos térmicos, foram considerados teores de umidade de 0% e para o material *in natura*, o PCU foi calculado considerando um teor de umidade do material de 18,47% em base úmida.

$$(7) PCU = PCI \left[\frac{(100-TU)}{100} \right] - 600 * TU$$

Onde:

PCI = poder calorífico inferior base úmida (kcal/g);

TU = teor de umidade base úmida (%).



Figura 14. Bomba calorimétrica utilizada para determinação do Poder Calorífico.

3.4.4 Densidade Energética

Para a determinação das densidades energéticas foram considerados o poder calorífico superior (PCS), o poder calorífico inferior (PCI) e as densidades do granel e sólidas determinadas anteriormente. A densidade energética foi obtida pelo produto entre o poder calorífico e a densidade do material (Equação 8), cuja unidade no SI é kJ/m^3 .

$$(8) De = PC * D$$

Onde:

PC = Poder calorífico (inferior/superior);

D = densidade (granel/aparente) kg/m^3 .

3.4.5 Rendimento Gravimétrico

O rendimento gravimétrico sólido (RGs) foi obtido para a torrefação a partir da

relação percentual entre a massa seca do caroço torreficado e a massa seca do caroço *in natura* (Equação 9). Para a carbonização o rendimento gravimétrico foi obtido pela relação percentual entre a massa de carvão seco e a massa de caroço seco (Equação 10). O rendimento gravimétrico do líquido pirolenhoso (RGL) foi obtido a partir da relação entre a massa de líquido pirolenhoso (Equação 11) e a massa seca de caroço na condição *in natura* (Equação 10). O rendimento gravimétrico dos gases não condensáveis (RGG) foi obtido pela diferença entre o RGs e o RGL conforme a Equação 12. O rendimento gravimétrico em carbono fixo (RGCF) foi obtido a partir do produto entre o rendimento sólido com o teor de carbono fixo da biomassa (Equação 13).

$$(9) \text{ RGs (\%)} = \frac{M_{\text{torreficada}}}{M_{\text{açai}}} \times 100$$

Onde:

Maçai = massa de caroço de açai seca a 0% de umidade (g);

Mtorreficada = Massa de caroço torreficado seco a 0% de umidade (g)

$$(10) \text{ RGs (\%)} = \frac{M_{\text{carvão}}}{M_{\text{açai}}} \times 100$$

Onde:

Maçai = massa de caroço de açai seca a 0% de umidade (g);

Mcarvão = Massa de carvão vegetal seco a 0% de umidade (g)

$$(11) \text{ RGL (\%)} = \frac{ML}{M_{\text{açai}}} \times 100$$

Onde:

Maçai = massa de caroço de açai a 0% de umidade (g);

ML = massa do líquido pirolenhoso (g).

$$(12) \text{ RGG(\%)} = 100 - (\text{RGs} + \text{RGL})$$

Onde:

RGs = rendimento gravimétrico sólido;

RGL = rendimento gravimétrico líquido.

$$(13) \text{ RGCF} = \text{RGs} \times \text{CF}$$

Onde:

RGs = rendimento gravimétrico sólido;

CF = teor de carbono fixo.

3.5 Delineamento

Foi realizada análise de variância para averiguação do efeito dos tratamentos nas propriedades físicas e energéticas do caroço de açaí, considerando um delineamento inteiramente casualizado composto por uma espécie e três tratamentos (*in natura*, torrefação e carbonização) e quatro repetições para cada tratamento. Os dados foram submetidos aos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett para verificar a normalidade dos resíduos e homocedasticidade de variâncias, respectivamente; teste não-paramétrico de Kruskal Wallis para comparações múltiplas; teste de Tukey para comparação de médias, e algoritmo de Scott-Knott que serve como facilitador ao teste de Tukey em caso de comparações múltiplas. As análises estatísticas foram realizadas no programa R v. 4.0.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Torrefação

Segundo RODRIGUES (2009) a torrefação é um tratamento para o condicionamento energético da madeira, pois as alterações provocadas por esse tratamento térmico tornam a biomassa mais homogênea, além de maior densidade energética gerada pela decomposição das hemiceluloses (PRINS, 2006). A partir da torrefação dos caroços de açaí (Figura 15), foi elaborado um gráfico (Gráfico 1) do perfil termogravimétrico obtido através do valor médio calculado a partir das quatro torrefações realizadas no presente estudo.



Figura 15. Carço de Açai torreficado.

As amostras foram submetidas a uma rampa de secagem de uma hora a 105°C antes de programado o início da torrefação a 220°C. É possível observar no Gráfico 1 que a curva de temperatura definida (Tdm) e do processo (Tpm) iniciaram em 105°C.

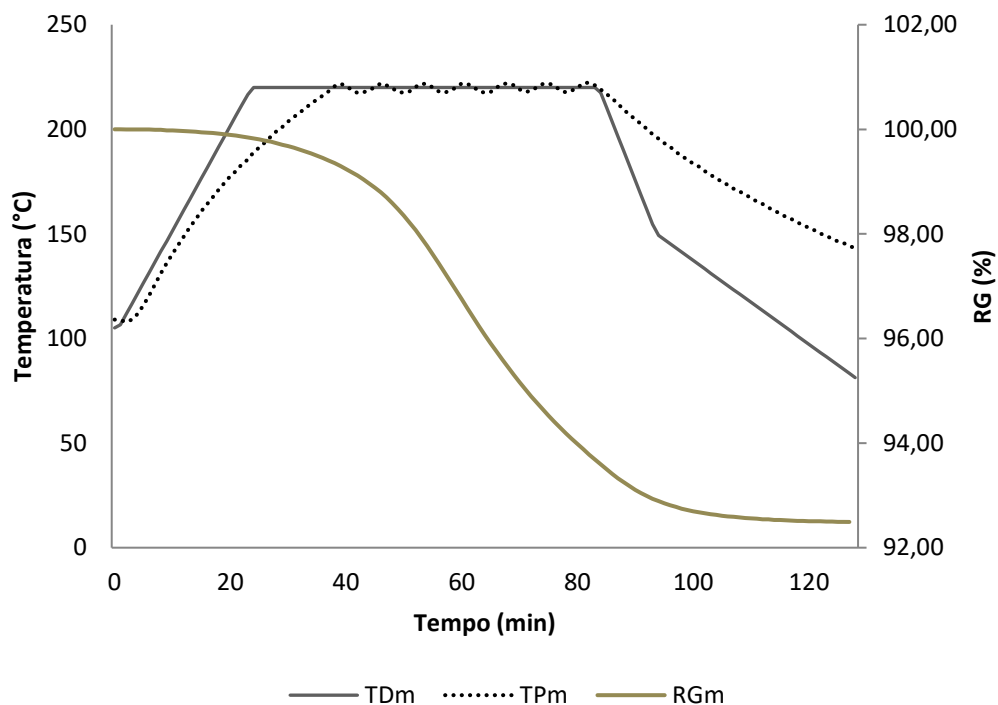


Gráfico 1. Perfil termogravimétrico das torrefações e curva média de rendimento gravimétrico. TDm: temperatura definida média. TPm: temperatura do processo média. RGm: rendimento gravimétrico médio.

Os termopares foram localizados no interior da câmara de torrefação, ou seja,

acomodados no mesmo ambiente fechado em que está localizada a amostra em questão. Desta forma, foi possível observar uma diferença que se torna mais proeminente aos 19 minutos de ensaio, onde a temperatura chegou em 160°C, a curva Tpm se distanciou da curva Tdm devido ao resfriamento causado pela evaporação da umidade restante na amostra e seus compostos orgânicos voláteis leves. As curvas Tdm e Tpm apresentaram um maior distanciamento a partir dos 25 minutos, onde a curva Tdm alcançou os 220°C e a curva Tpm se encontrava em 200°C.

O rendimento gravimétrico médio obtido, considerando as quatro torrefações realizadas foi de 92,61% (Gráfico 2) em base seca, com um coeficiente de variação de 0,4%. Em todo processo foi possível observar uma homogeneidade em todos os ensaios, demonstrando a eficiência do sistema de torrefação adotado. RODRIGUES (2009) obteve um rendimento gravimétrico da madeira de *Eucalyptus grandis* torrificada a 220°C de 96,39%.

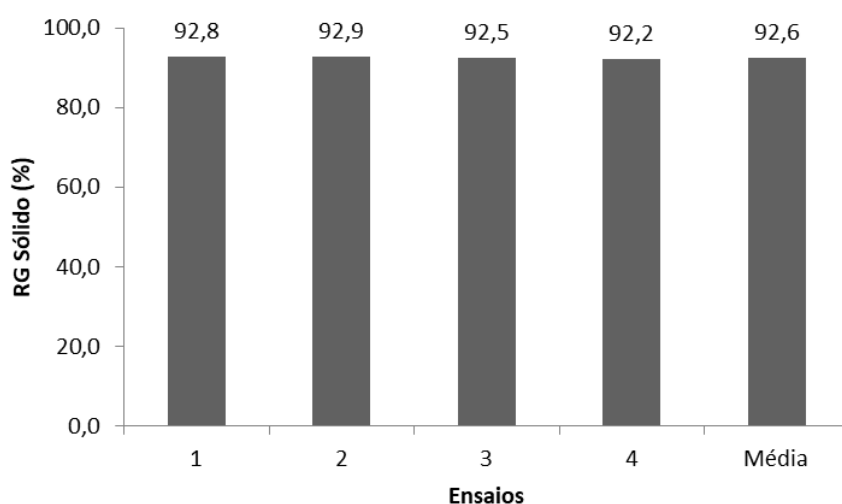


Gráfico 2. Rendimento gravimétrico sólido em base seca do caroço de açaí torrificado.

O rendimento gravimétrico em carbono fixo (Gráfico 3) relaciona o teor de carbono fixo da biomassa com o seu rendimento gravimétrico sólido, a partir dessa relação, obtêm-se o rendimento em carbono fixo que apresenta uma relação diretamente proporcional aos teores de lignina, extrativos e massa específica da biomassa, e inversamente proporcional ao teor de holocelulose.

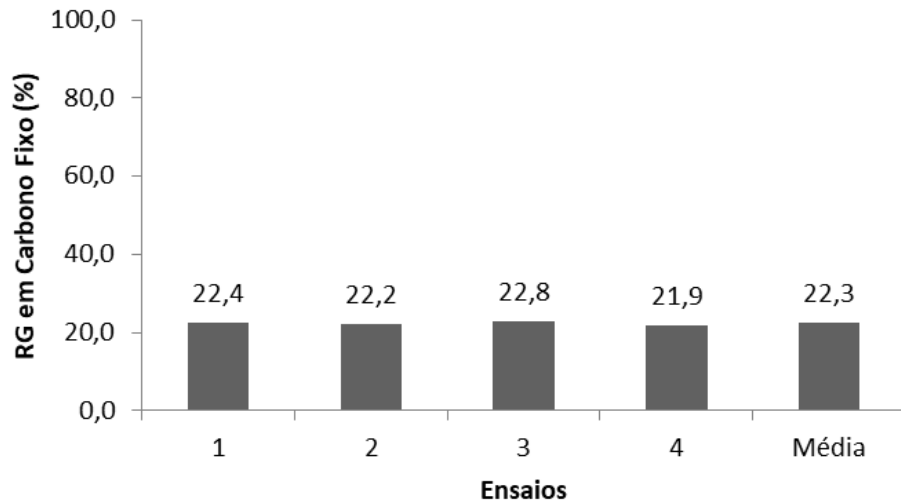


Gráfico 3. Rendimento em carbono fixo para caroço de açaí torreficado.

PROTÁSIO *et al.*, (2012) em um estudo sobre resíduos do processamento dos grãos de café, obtiveram rendimentos médios em carbono fixo para os briquetes torreficados de casca e pergaminho de café de 27,12%. O valor médio obtido para o caroço de açaí torreficado foi de 22,3%, com um coeficiente de variação de 1,72%, inferior ao descrito pelo citado autor.

A curva da derivada da perda de massa média (dPM), a curva TPm e TDm estão apresentadas no Gráfico 4. A derivada da perda de massa média das amostras foi reajustada a partir da média móvel para evidenciar o pico de degradação ocorrido durante os ensaios de torrefação.

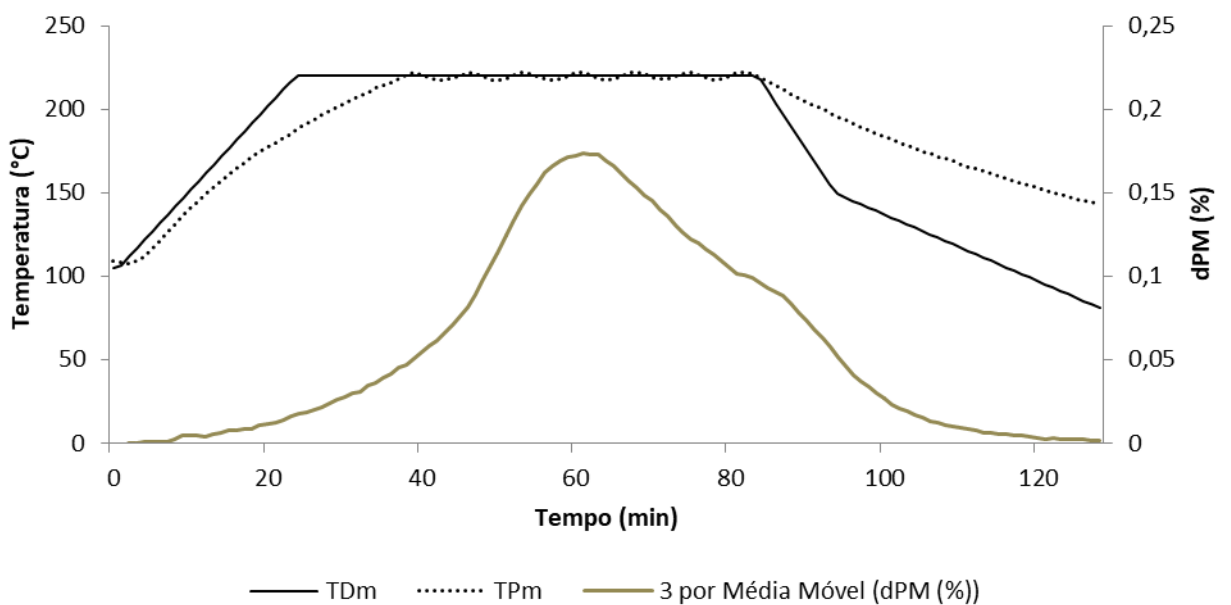


Gráfico 4. Média móvel da derivada da perda de massa média, temperatura média

processo e temperatura definida. TDm: temperatura definida. TPm: temperatura média do processo. dPM: derivada da perda de massa média.

A curva da derivada da perda de massa média apresentou um pico de degradação eminente, aos 60 minutos, com temperatura de 170°C. O pico ocorreu na faixa de temperatura onde se inicia a degradação dos componentes químicos da biomassa, aliado à perda de água que ainda estava em evaporação no processo.

4.2 Carbonização

Segundo RODRIGUES (2009) o fator que diferencia a torrefação da carbonização é o caráter endotérmico da torrefação. A biomassa torrificada é considerada um meio termo entre o material na condição *in natura* e o material carbonizado. A carbonização é caracterizada por ser um processo de degradação térmica irreversível, que se inicia a partir da secagem da biomassa até a pirólise, fase em que a biomassa sofre as principais modificações químicas e físicas para se transformar em carvão vegetal, produto com alto teor de carbono fixo. O produto sólido do processo de carbonização dos caroços de açaí é apresentado na Figura 16.



Figura 16. Carvão de caroço de Açaí.

A carbonização dos caroços de açaí para análise de seu potencial energético e das curvas de perda de massa possibilitaram a elaboração de gráficos para cada um dos perfis de temperatura, em função do tempo de queima das quatro carbonizações

realizadas. A linha laranja sólida TPm representa a temperatura no limite da amostra com a fonte de calor. As curvas abaixo da curva TPm, intituladas TAm representam a temperatura no centro da amostra dentro do reator, no ponto médio entre as resistências elétricas. A linha preta sólida TDm é a linha definida a partir da programação definida previamente.

As curvas de temperatura pelo tempo, das quatro carbonizações dos caroços de açaí ensaiados, foram plotadas no Gráfico 5.

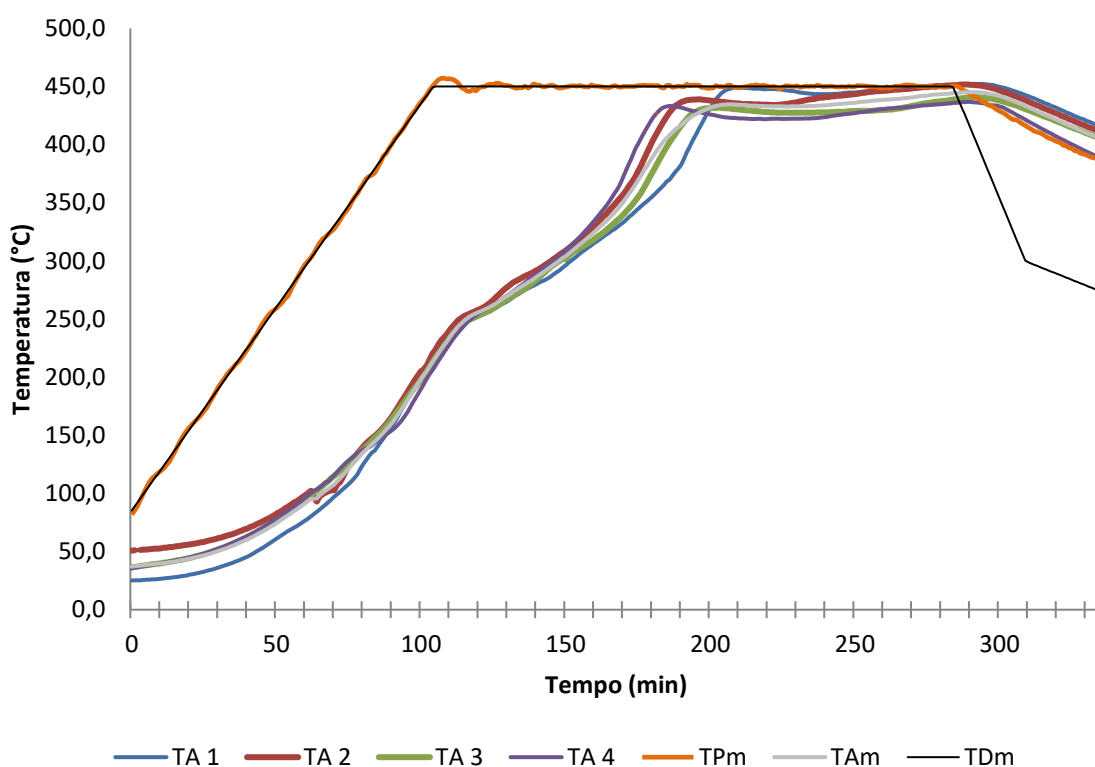


Gráfico 5. Perfis de temperaturas das carbonizações das amostras de caroço de açaí e curva média. TPm: temperatura na fronteira da amostra com a fonte de calor. TDm: temperatura definida. TA: temperatura da amostra correspondente (1, 2, 3 e 4). TAm: temperatura média das amostras.

Observa-se a homogeneidade dos quatro perfis térmicos que se comportaram de forma similar ao longo de todo o processo. No minuto 100 a uma temperatura de 200°C até o minuto 150 com temperatura de 300°C, se dá início de forma lenta, as modificações químicas, onde os constituintes macromoleculares; celulose, hemicelulose, lignina e extrativo começam a se dissociar pela ação do calor, com produção de gases oxigenados. A curva que mais se diferenciou das demais curvas foi a TA1, a partir do minuto 180 a 350°C nota-se a diminuição na escalada de temperatura. Nesse mesmo período as

demais curvas iniciam o processo de leve distanciamento uma das outras, a biomassa nesse momento já é considerada carvão, porém, ainda existem grandes quantidades de gases voláteis, devido a contínua irradiação de calor na superfície da amostra.

A partir dos perfis de temperatura de cada uma das amostras, foi elaborado um gráfico da derivada da temperatura média pelo tempo de queima (Gráfico 6), sendo destacados os picos de temperatura onde ocorre o clímax das reações exotérmicas.

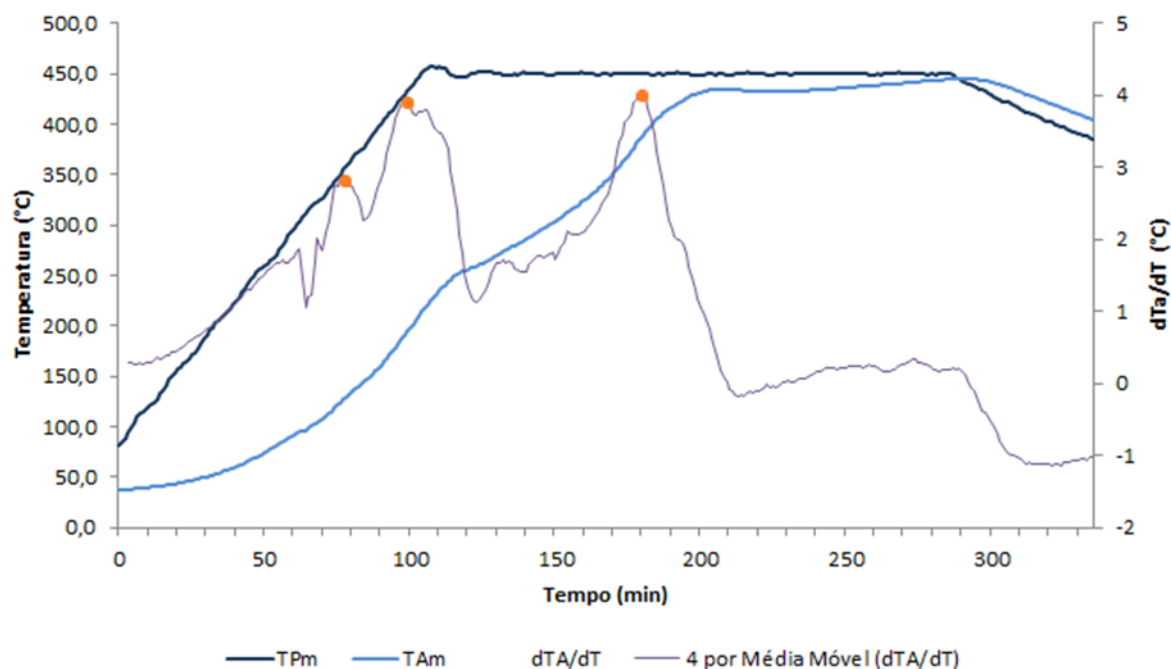


Gráfico 6. Perfil térmico com derivada da temperatura interna para a carbonização do caroço de açaí.

Notam-se três picos que se sobressaem dentre os demais, o primeiro ocorre no minuto 80 a 345°C, o segundo no minuto 100 a 425°C, e o terceiro também a 425°C mas, no minuto 180. O primeiro pico de temperatura ocorre pela fase exotérmica, que se encontra o ensaio de carbonização com liberação de gases voláteis, que provocaram o aumento repentino na temperatura. Os dois picos que ocorreram numa mesma temperatura, porém em diferentes períodos no tempo, aconteceram ainda na fase exotérmica da carbonização. Neste momento foi observada uma grande produção de hidrocarbonetos, aumentando significativamente o poder calorífico dos gases voláteis, processo esse responsável por aumentar consideravelmente a temperatura, ocasionando diversos picos durante a queima.

A partir dos resultados dos ensaios de carbonização foi possível obter os rendimentos do processo de carbonização do caroço de açaí. No Gráfico 7 observa-se o

rendimento líquido em base seca, com média de 43,2%, onde, ensaio 1 apresentou um leve aumento no rendimento líquido em relação aos demais ensaios. O coeficiente de variação obtido foi de 2,1%, é possível afirmar que as carbonizações realizadas tiveram uma alta homogeneidade.

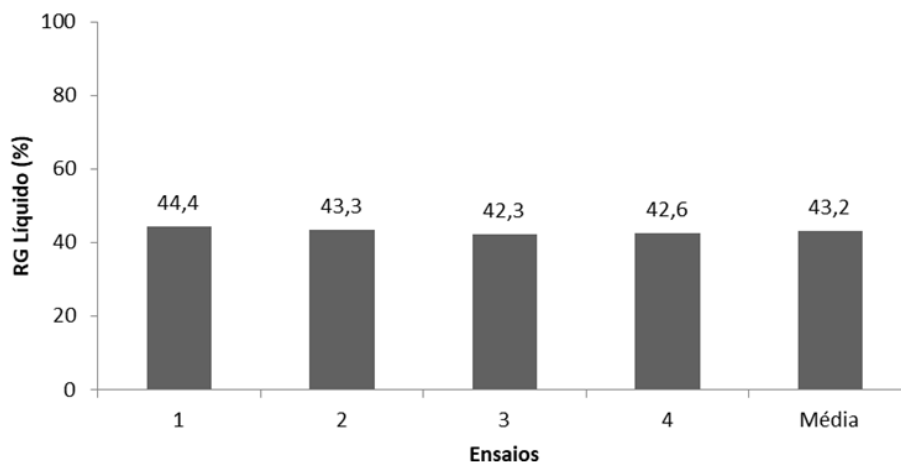


Gráfico 7. Rendimento gravimétrico líquido em base seca do caroço de açáí.

LOUREIRO *et al.*, (2021) em um estudo de avaliação do rendimento gravimétrico da carbonização e caracterização qualitativa do carvão vegetal em clones de híbridos de *Corymbia spp* para uso industrial, obtiveram um rendimento líquido de 45,14%. SOARES *et al.*, (2014) obtiveram um rendimento líquido médio, para híbridos de eucalipto, de 31,61% para 3 anos, 30,55% para 5 anos e 33,06% para 7 anos.

O rendimento gravimétrico sólido do processo de carbonização é apresentado no Gráfico 10. O valor médio obtido foi de 37,4%, VALE *et al.*, (2011) em um estudo sobre o potencial energético da biomassa e carvão vegetal do epicarpo e da torta de pinhão manso, obtiveram um rendimento gravimétrico sólido de 38,1%, valor pouco superior ao encontrado no presente estudo que foi de 37,4% (Gráfico 8) com um coeficiente de variação de 2,3%.

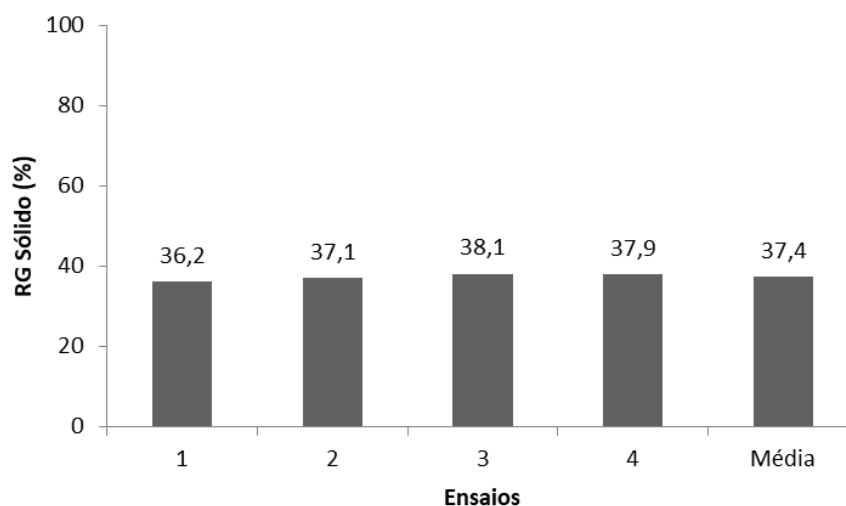


Gráfico 8. Rendimento gravimétrico sólido em base seca do caroço de açai.

LOUREIRO *et al.*, (2021) obtiveram um rendimento sólido de 32,86% para clones de híbridos de *Corymbia spp.* Os valores obtidos por SOARES *et al.*, (2014) para híbridos de eucalipto foram de 40,22% para 3 anos, 44,19% para 5 anos e 38,55% para 7 anos.

Ao extrapolar os dados de rendimento gravimétrico obtido no presente estudo para a produção no ano de 2019 do fruto de açai no estado do Pará, considerando o teor de umidade em base seca obtido neste estudo (TU = 20,63%) foi possível obter um total de 37.351,166 toneladas de carvão de caroço de açai.

O valor médio de rendimento gravimétrico gasoso obtido no presente estudo foi de 19,5% (Gráfico 9) e seu CV de 0,2%, valor inferiores aos encontrados para madeira. LOUREIRO *et al.*,(2021) obtiveram 22,00% para clones de híbridos de *Corymbia spp.* e SOARES *et al.*, (2014) de 28,18% para 3 anos, 25,26% para 5 anos e 28,39% para 7 anos.

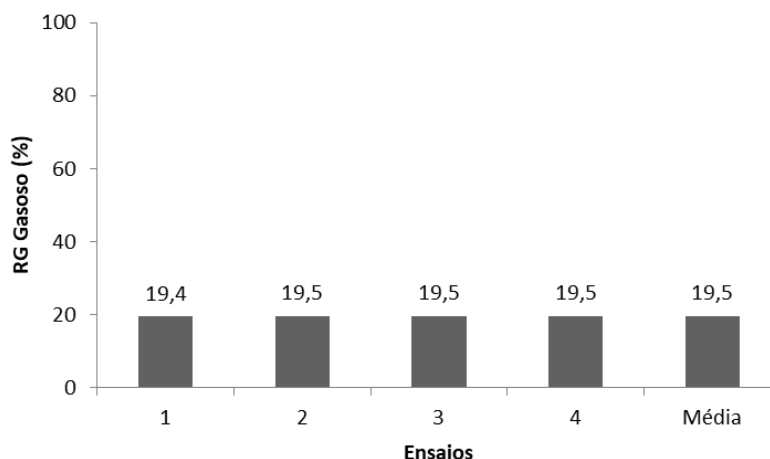


Gráfico 9. Rendimento gravimétrico gasoso em base seca do caroço de açaí.

Com as três variações de rendimentos gravimétricos obtidos a partir das carbonizações realizadas foi possível plotar um gráfico que distribui os rendimentos sólido, líquido e gasoso em 100%, facilitando a comparação de seus respectivos valores para cada um dos ensaios. Observou-se que a distribuição dos rendimentos foi bastante homogênea entre os ensaios, não havendo uma variação evidenciada a partir do Gráfico 10.

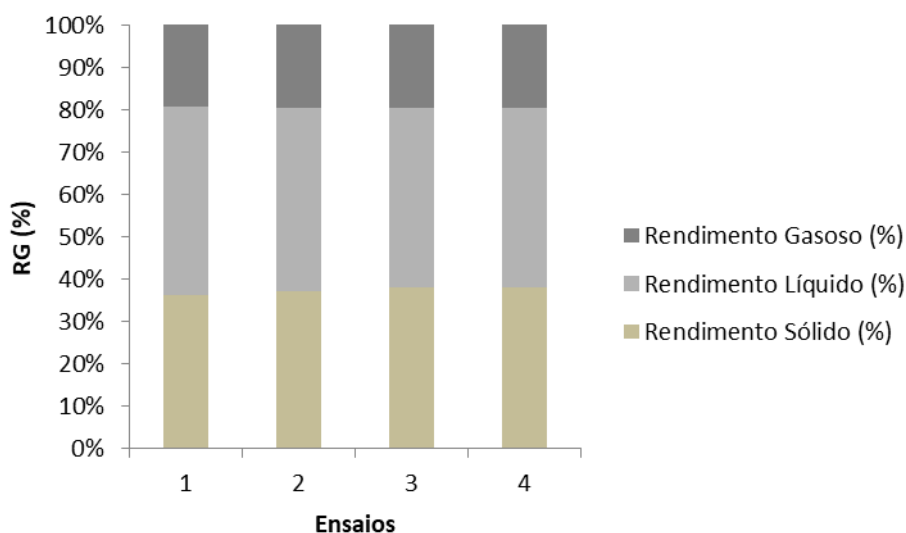


Gráfico 10. Rendimentos gravimétricos do caroço de açaí em quatro ensaios.

O rendimento em carbono fixo indica a quantidade de carbono presente na madeira que ficou retida no carvão, o valor médio obtido para o caroço de açaí carbonizado foi de 28,7% (Gráfico 11), os ensaios apresentaram uma baixa variação dos dados com um CV de 1,42%. Segundo ANDRADE (1989) o rendimento em carbono fixo é o parâmetro

que melhor expressa a qualidade energética do material lignocelulósico para a produção de carvão vegetal.

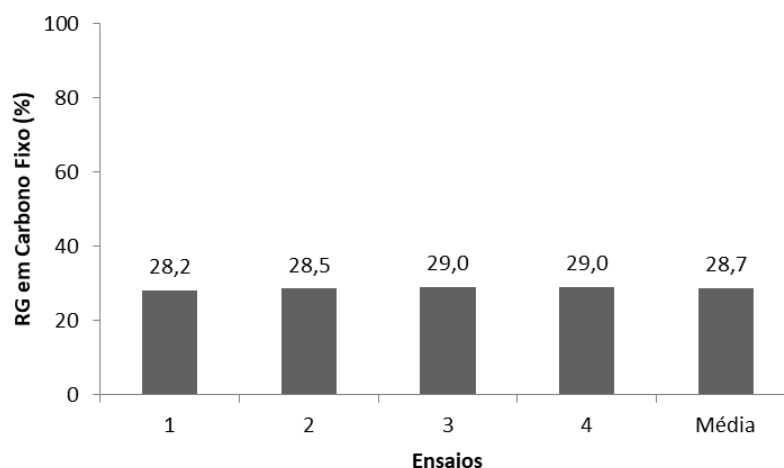


Gráfico 11. Rendimento gravimétrico em carbono fixo do carvão de caroço de açaí.

SILVA *et al.*, analisaram o carvão da casca, maravalha e serragem de *Eucalyptus pellitas* e obtiveram rendimentos em carbono fixo (RCF) médios distribuídos num intervalo de 21,73% a 28,47%, no carvão de maravalha carbonizada a 400°C e da casca carbonizada a 600°C, respectivamente. LOUREIRO *et al.*,(2021) obtiveram um RCF de 25,57% para carvão vegetal em clones de híbridos de *Corymbia spp.* Desta forma, os valores encontrados para carvão de caroço de açaí se encontram no intervalo dos valores observados na literatura.

4.3 Propriedades Físicas e Energéticas

4.3.1 Densidade Sólida Aparente e Teor de Umidade

O teor de umidade médio em base seca obtido para as amostras de açaí na condição *in natura* foi de 22,63%, com um coeficiente de variação de 17,3%. As amostras analisadas apresentaram densidade sólida aparente média (Tabela 2) de 964,524 kg/m³, 910,958 kg/m³ e 758,829 kg/m³ para os tratamentos *in natura*, torrefação e carvão, respectivamente a 0% de teor de umidade. O material *in natura*, a um teor de umidade de 22,63%, apresentou uma densidade sólida aparente de 1042,15 kg/m³, cerca de 29,95% maior que o obtido por NAGAISHI (2007) em seu trabalho sobre extrativismo, características, energia e renda de uma comunidade a partir do açaí, com análise do caroço de açaí recém despulpado a um teor de umidade médio em base

seca de 30,34% obtendo uma densidade sólida de 730 kg/m³.

Tabela 2. Valores médios de densidade sólida aparente, teste da razão de verossimilhança de Scott-Knott e coeficiente de variação dos caroços de açaí em seus três tratamentos.

Tratamento	TU (%) ¹	Densidade Sólida Aparente (kg/m ³)	CV (%)
<i>In Natura</i>	22,63	1042,157 a	17,3
	0	964,524 b	22,7
Torrefação	0	910,958 c	10,9
Carbonização	0	758,829 d	6,5

¹ base seca

Os caroços de açaí na condição *in natura* apresentaram-se muito heterogêneos no tamanho, provavelmente devido à diferença de tempo de formação de cada um, isso pode ser observado no maior coeficiente de variação quando comparado aos demais tratamentos. A ação do calor nos tratamentos termoquímicos tem influência maior na perda de massa em relação ao volume e isso leva a uma diminuição da densidade aparente sólida do material. Esta ação propicia também a homogeneização das amostras em cada tratamento, conforme se observa com a diminuição do coeficiente de variação. Os tratamentos de torrefação e carbonização do material diminuíram a densidade aparente sólida em 5,56% e 21,32 % respectivamente. Na torrefação essa diminuição se deve a uma degradação térmica parcial, principalmente de parte das hemiceluloses. Na carbonização há uma degradação total tanto de hemiceluloses, quanto da celulose e lignina.

Segundo análise do algoritmo de Scott-Knott a 5% de significância, que utiliza o teste da razão de verossimilhança para agrupar diferentes grupos, foi considerado que os tratamentos *in natura*, a 0% de TU, e torrefação fossem agrupados em um grupo “a”. O tratamento de carbonização foi agrupado em outro grupo denominado “b”. O material *in natura* a 22,63% de TU também apresentou diferença significativa dos demais tratamentos. A análise de variância foi rejeitada, portanto, o efeito dos tratamentos é significativo. Essa análise foi realizada utilizando o teste não paramétrico de Kruskal Wallis, usado para testar a hipótese nula de que todos os tratamentos possuem funções de distribuição iguais contra a hipótese alternativa de que ao menos duas das populações

possuem funções de distribuição diferentes.

De acordo com o teste de Tukey a 5% de significância, que realiza a comparação múltipla das médias, não existe diferença significativa na densidade sólida aparente nos tratamentos *in natura* a 0 % de TU e torrefação, e estes dois tratamentos se diferem dos tratamentos de carbonização e *in natura* a 22,63% de TU, o qual foi diferente significativamente dos demais tratamentos.

4.3.2 Densidade do Granel

Os valores referentes à densidade do granel são apresentados na Tabela 3. Foi possível observar um menor valor de densidade do granel para o material na condição *in natura* em relação ao material torreficado. Em sua condição natural, o caroço de açaí é envolto por diversas fibras residuais que criam diversos espaços vazios (Figura 17) quando são alocados em um recipiente, conseqüentemente esse material apresenta uma menor massa por unidade de volume do granel por apresentar uma quantidade elevada de fibras, que interfere na acomodação dos caroços, diminuindo o número deles por unidade de volume.



Figura 17. Carochos de açaí *in natura*.

Os tratamentos termoquímicos diminuem consideravelmente a quantidade de fibras residuais que permeiam o caroço de açaí, portanto a densidade do granel do material torreficado e carbonizado não é influenciada pelas fibras residuais (Figura 18).



Figura 18. Caroços de açaí em três condições. 1 – In natura, 2 – torreficado, 3 – carbonizado.

Tabela 3. Valores médios de densidade do granel, teste da razão de verossimilhança de Scott-Knott e coeficiente de variação dos caroços de açaí em seus três tratamentos.

Tratamento	Teor de umidade (%)	Densidade Granel (kg/m ³)	CV (%)
<i>In Natura</i>	18,47	507,457 a	4,9
	0	449,62 b	3,7
Torrefação	0	547,445 c	3,1
Carbonização	0	345,942 d	5,5

A densidade do granel do tratamento *in natura* a 18,47% de TU foi de 507,457 kg/m³, superior ao encontrado por COSTA (2018), 456,597 kg/m³ e NAGAISHI (2007), 470 kg/m³. Os valores para os tratamentos termoquímicos encontrados foram de 547,445 kg/m³ e 345,942 kg/m³ para torrefação e carbonização, respectivamente. O baixo coeficiente de variação das amostras demonstra que os dados se apresentaram bem próximos à média, sendo consideradas amostras bastante homogêneas.

De acordo com a análise de variância, os tratamentos exerceram efeito sob a densidade do granel. O teste de Tukey mostrou que não houve diferenças significativas entre o tratamento *in natura* e torrefação, porém, quando esses tratamentos foram

comparados com a carbonização, foi detectada diferença significativa. Apesar do teste de Tukey não ter determinado diferença significativa entre os tratamentos *in natura* e torrefação o algoritmo de Scott-Knott a 5% de significância não os agrupou em uma mesma categoria, conforme Tabela 3, sendo necessária a realização de ensaios com uma maior amostragem em trabalhos futuros.

4.3.3 Análise imediata

No Gráfico 12 encontram-se os valores de análise imediata obtidos para o caroço de açaí *in natura*, torrefação e carbonização, respectivamente. Nota-se que os valores corroboram aos valores encontrados na literatura.

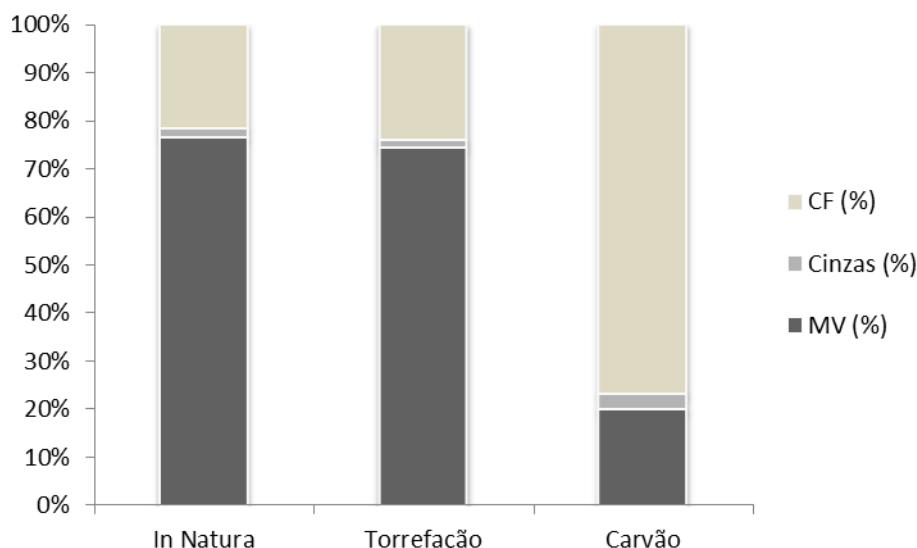


Gráfico 12. Teor de material volátil (MV), teor de cinzas (Cinzas) e teor de carbono fixo (CF) do caroço de açaí em seus respectivos tratamentos.

Observa-se na Tabela 4 o teor médio de material volátil de 76,498% no tratamento *in natura*, 74,329% para o material torreficado e 19,938% para o carbonizado. NAGAISHI (2007) obteve um teor médio de MV de 77,62% para o caroço de açaí *in natura*. Os valores encontrados no presente estudo confirmam o descrito por CORTEZ; LORA (1997) que o teor de material volátil oscila entre a faixa de 65 a 83% para os materiais *in natura*.

Tabela 4. Valores médios de análise imediata, teste da razão de verossimilhança de Scott-Knott e coeficiente de variação dos caroços de açaí em seus três tratamentos.

Tratamento	MV (%)	CV (%)	Cinzas (%)	CV (%)	CF (%)	CV (%)
------------	--------	--------	------------	--------	--------	--------

<i>In Natura</i>	76,498 a	0,7	1,873 a	11,2	21,627 a	2,18
Torrefação	74,329 b	0,6	1,547 b	3,1	24,123 b	1,64
Carbonização	19,938 c	4,3	3,305 c	5,9	76,757 c	0,95

MV: material volátil. CV: coeficiente de variação. CF: carbono fixo.

O teor de material volátil do material carbonizado foi bastante inferior ao encontrado nos materiais torreficados e *in natura*, esta situação foi ocasionada pelo próprio processo de carbonização onde, a primeira perda de massa do material durante a queima é devido à perda de umidade, que ocorre até 150°C. Posteriormente, os voláteis leves são queimados entre 170 e 370°C, devido à decomposição da celulose e hemicelulose. O terceiro momento ocorre entre 400 e 700°C, onde ocorre a decomposição de lignina, na qual os voláteis mais pesados são queimados (IOANNIDOU *et al.*, 2009).

A análise de variância e o teste de comparação de médias de Tukey demonstraram que os tratamentos foram diferentes entre si para os três ensaios de análise imediata realizados, o que foi confirmado pelo algoritmo de Scott-Knott a 5% de significância, onde cada um dos tratamentos foi agrupado em uma categoria única para cada um deles.

BARCELLOS *et al.*, (2000) afirmaram que o teor de cinzas depende diretamente da quantidade de materiais inorgânicos existentes no material incinerado. No presente estudo, o teor de cinzas encontrado para as amostras de cada tratamento foi de 1,873%, 1,547% e 3,305%, *in natura*, torrefação e carbonização, respectivamente. Foi observada uma diminuição no teor de cinzas para o material torreficado em relação ao material *in natura*, tal diminuição pode ter sido ocasionada pela menor presença de fibras residuais presentes na amostra torreficada. O maior teor de cinzas no material *in natura* apresentou um maior CV, demonstrando ser um material mais heterogêneo portando podendo conter uma maior quantidade de fibras residuais que contribuíram para o aumento do teor de cinzas da amostra.

SEYE *et al.*,(2008) em um estudo de caracterização do caroço de açaí como insumo para geração de eletricidade via gaseificação, encontraram um teor de cinzas para o caroço de açaí *in natura* de 1,15%. Vieira (2005) em seu estudo de caracterização de resíduos agrícolas, tais como resíduo de soja, casca de arroz, bagaço de cana e sabugo de milho encontrou teores de cinzas entre 0,7 a 15,51%.

O carvão vegetal é um combustível sólido composto principalmente por carbono,

embora possua alguns elementos não liberados como oxigênio, hidrogênio, nitrogênio e enxofre. O teor de carbono fixo encontrado para o tratamento *in natura* foi de 21,627%, superior ao encontrado por SEYE *et al.*, (2008) que foi de 18,5% e NAGAISHI (2007) de 20,95%. BRITO; BARRICHELO (1982), mencionaram que os teores de carbono fixo da madeira encontram-se entre 15% a 25%. No presente estudo o estudo teor de carbono fixo para os tratamentos *in natura* e torrefação estão dentro da margem descrita pelos autores. Para o tratamento de carbonização dos caroços de açaí, o teor de carbono fixo foi de 76,75%, esse valor se dá ao próprio processo de carbonização que tem como objetivo concentrar o carbono, que ocorre devido à eliminação da maior parte do hidrogênio e oxigênio da madeira (BRITO, 1990).

4.3.4 Poder Calorífico

O poder calorífico representa a quantidade de calor liberada, por unidade de massa do combustível, quando a combustão se dá de forma completa (ÇENGEL;BOLES, 2006; SOARES *et al.*, 2006). Na Tabela 5 são apresentados os valores obtidos de poder calorífico. O carvão vegetal do caroço de Açaí, como era de se esperar, apresentou os maiores valores para poder calorífico superior (7396,8 kcal/kg), seguido do caroço torreficado (4714,1 kcal/kg) e na condição *in natura* (4558,4 kcal/kg).

Segundo KOLLMANN; CÔTE (1968) o poder calorífico da biomassa seca, sem considerar o teor de cinzas, pode ser tomado como um valor médio de 4.500 kcal/kg. SOARES *et al.* (2015) relataram que o poder calorífico superior do carvão vegetal de madeiras encontra-se próximo de 7.000 kcal/kg. RODRIGUES (2009) em um estudo sobre os efeitos da torrefação no condicionamento de biomassa para fins energéticos obteve um poder calorífico superior de 4858,13 kcal/kg para amostra torreficada a 220°C de madeira de *Eucalyptus grandis*, cerca de 3,78% maior que sua amostra testemunha. PASSINHO *et al.*, (2019) em um estudo sobre o uso da semente de açaí como alternativa energética na indústria de beneficiamento de polpa de açaí encontraram PCS de 4860.89 kcal/kg, valor superior ao encontrado no presente estudo, considerando o mesmo material na condição *in natura*.

A partir dos resultados de PCS encontrados foi possível inferir que para os tratamentos termoquímicos de torrefação e carbonização houve um incremento médio de 3,42% e 62,27% respectivamente, quando comparados ao PCS do caroço de açaí *in natura*.

O poder calorífico inferior considera a perda de energia necessária para a evaporação da água proveniente da combustão do hidrogênio. Para o presente estudo, considerando tal perda de energia, houve um incremento médio em relação ao caroço *in natura* de 4,32% e 70,22% na torrefação e carbonização, respectivamente.

Tabela 5. Poder calorífico superior (PCS), inferior (PCI) e útil (PCU), e seus respectivos coeficientes de variação.

Tratamento	PCS (kcal/kg)	CV (%)	PCI (kcal/kg)	CV (%)	PCU (kcal/kg)	CV (%)
<i>In natura</i>	4558,4	0,2	4234,4	0,3	3341,5	0,3
Torrefação	4714,1	0,5	4417,1	0,5	4417,1	0,5
Carbonização	7396,8	0,4	7207,8	0,4	7207,8	0,4

O poder calorífico útil é a energia efetivamente disponível por unidade de massa, depois de deduzida a perda com a evaporação da água formada na combustão do hidrogênio e da umidade do material, que no presente estudo foi obtido 18,47% em base úmida (ÇENGEL; BOLES, 2006; BRIANE; DOAT, 1985; JARA, 1989). PASSINHO *et al.*, (2019) obtiveram um PCU de 4277.24 kcal/kg, valor superior ao encontrado neste estudo. Considerando o PCU a energia efetiva da amostra, observa-se um incremento médio 32,19% e 115,71% no tratamento de torrefação e carbonização, respectivamente, quando comparados ao material na condição *in natura*. Desta forma, é possível afirmar que os tratamentos termoquímicos aumentaram o PCU a partir da redução da umidade e aumentaram o potencial energético da biomassa.

4.3.5 Densidade Energética

A densidade energética é considerada uma das mais importantes propriedades de avaliação das características energéticas de um biocombustível. Ela relaciona a densidade (granel ou sólida) e o poder calorífico na sua determinação, englobando então as características químicas e físicas da biomassa para a produção de energia na forma de calor.

São apresentados na Tabela 6, os valores de densidade energética do granel para o caroço do açaí em seus três tratamentos. Houve um aumento percentual dos tratamentos de torrefação e carbonização de 42,61% e 47,05%, respectivamente, quando comparados ao material *in natura* a 18,47% de teor de umidade (base úmida). O caroço de Açaí seco a 0% de teor de umidade apresentou um incremento de 12,28% na densidade energética quando comparado ao mesmo material a um teor de umidade de

18,47% em base úmida. O carvão vegetal em geral possui elevado poder calorífico e, devido à baixa higroscopicidade, também apresenta elevado poder calorífico inferior. PINHEIRO *et al.*, (2005) em um estudo de determinação da densidade energética do granel de diversos resíduos vegetais obtiveram uma densidade energética para o caroço de açaí *in natura*, com um teor de umidade de 30,06% (base úmida), de 2.650.000,00 kcal/m³, valor superior ao obtido no presente estudo que foi de 1.695.650,28 kcal/m³ considerando o caroço de açaí a um teor de umidade de 18,47% (base úmida). A diferença foi diretamente influenciada pelo maior valor de teor de umidade e de densidade do granel no trabalho de PINHEIRO *et al.* (2005).

Tabela 6. Densidade energética do granel do caroço de açaí.

Tratamento	Teor de Umidade (%)	Densidade Energética do Granel* (kcal/m ³)	Incremento (%) em relação à condição <i>in natura</i> a 0% de TU
<i>In Natura</i>	18,47	1.695.650,28 a	-
	0	1.903.891,06 b	12,28
Torrefação	0	2.418.133,00 c	42,61
Carvão	0	2.493.463,45 d	47,05

*Produto entre o poder calorífico e a densidade do granel. PCU para a condição *in natura* a 18,47% e PCI para os demais tratamentos a 0% de TU.

Foi observada uma leve diminuição (1,73%) na densidade energética sólida aparente do material torreficado em relação ao material *in natura* seco a 0% (Tabela 7), portanto, o maior poder calorífico obtido com a torrefação não foi suficiente para o aumento na densidade energética sólida do material, considerando uma situação laboratorial. Porém, quando a comparação se dá em uma situação de uso na prática, onde o material não passa por uma secagem artificial, onde há umidade (18,47% TU), o incremento energético do material torreficado é de 15,55%.

Tabela 7. Densidade energética sólida aparente do caroço de açaí.

Tratamento	Teor de Umidade (%)	Densidade Energética Sólida Aparente* (kcal/m ³)	Incremento (%) em relação à condição <i>in natura</i> a 0% de TU
<i>In Natura</i>	18,47	3.482.332,12 a	-

	0	4.084.156,31 b	17,28
Torrefação	0	4.023.815,36 c	15,55
Carvão	0	5.469.449,72 d	57,06

*Produto entre o poder calorífico e a densidade sólida aparente. PCU para a condição *in natura* a 18,47% e PCI para os demais tratamentos a 0% de TU.

Para o material carbonizado, houve um aumento de 57,06% na densidade energética aparente sólida do material quando comparado ao tratamento *in natura* ainda úmido (18,47% TU). Portanto, em uma situação prática utilizando o caroço de açaí úmido há um ganho considerável em condicionamento energético a partir dos tratamentos analisados. Para os cálculos não foram considerados os gastos energéticos dos reatores para a execução dos ensaios de ambos os tratamentos.

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Os valores obtidos de densidade aparente sólida do caroço de Açaí na condição *in natura* foram maiores que o encontrado na literatura, apresentando uma alta densidade e um comportamento esperado para os tratamentos termoquímicos. Não houve diferença significativa na densidade aparente sólida do material *in natura* seco a 0% e o material torreficado.

Os diversos espaços vazios gerados pelas fibras do caroço de açaí influenciaram na densidade do granel, apresentando um comportamento diferente do que se espera ao analisar outros tipos de biomassa. O material *in natura* e torreficado, apresentaram diferença significativa quando comparados ao material carbonizado.

Os valores de análise imediata e poder calorífico obtidos para a condição *in natura* e para os tratamentos termoquímicos corroboram os descritos pela literatura no que tange o potencial de utilização como fonte de energia.

O processo de torrefação trouxe uma maior homogeneidade para o material, possibilitando seu uso para fins que exijam uma maior padronização de queima, e quando comparado ao material na condição *in natura* úmido, apresentou um aumento na densidade energética.

O material carbonizado apresentou uma maior relação de aumento de concentração do potencial energético em relação ao material *in natura*. Apresentou rendimento

gravimétrico sólido em consonância com os valores encontrados para carvão a partir de madeiras.

O rendimento em líquido pirolenhoso foi maior que o observado na literatura para espécies madeireiras, podendo ampliar o potencial de utilização desse material devido ao seu alto rendimento quando comparado aos licores com origem da madeira.

O rendimento em carbono fixo se encontra dentro do intervalo dos valores de carvão oriundos de madeira, a matéria-prima mais utilizada para a produção de carvão vegetal no Brasil.

O caroço de açaí na condição *in natura*, torreficado ou transformado em carvão vegetal apresenta excelentes qualidades para uso como insumo energético.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTMAN, F. F. A. O caroço de açaí (*Euterpe oleracea Mart.*). Belém, Brasil, Instituto Agrônômico. Boletim Técnico n.31, 1956.

ALVES, S.M; VASCONCELOS, M.A.M. Sistema de produção do açaí: colheita e pós-colheita. Disponível em: http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Acai/SistemaProducaoAcai_2ed/paginas/colheita.htm. Acesso em 25/10/2019.

ANDRADE, A. M. de, Influência da casca de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden no rendimento e qualidade de carvão vegetal, Dissertação de M.Ss1989. 86 f. PPGCF/UF, Viçosa, MG, Brasil, 1989.

BARCELLOS, D.C. et al. O estado da arte das plantações de florestas de rápido crescimento para produção de Biomassa para energia em Minas Gerais: aspectos técnicos, econômicos, sociais e ambientais.. 1. ed. Belo Horizonte: CEMIG, 2000. v. 1. 44 p.

BEENACKERS, A. A. C. M.; BRIDGWATER, A. V. "Gasification and pyrolysis of biomass in Europe", in "Pyrolysis and Gasification". Elsevier Applied Sciences, Londres, v. 1, n. 1, p. 129-155, Nov. 1989.

BRAND, M. A. Energia de biomassa florestal. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131p.

BRANDÃO, C. R. F.; BARROS, A. L. O Açaí no Estado do Pará e seu Potencial para

o Desenvolvimento Sustentável da Região. 2015.

BRASIL. Congresso. Câmara dos Deputados. Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos. 2. ed. Brasília, 2012. 73 p. Disponível em: <http://www.saude.rs.gov.br/upload/1346166430_Lei%2012.305_02082010_politica_residuos_solidos.pdf> Acesso em: 10/10/2018.

BRIANE, D.; DOAT, J. Guide Technique De La Carbonisation La Fabrication du Charbon de Bois. Agence Française Pour la Maitrise de L`Energie. Association Bois de Feu. Centre technique forestier tropical. PREFACE D´ARTHUR REIDACKER - AFME. Edisud, 1985, pág 28.

BRITO, J. O. (1990). Princípios de produção e utilização de carvão vegetal de madeira. Piracicaba: Departamento de Ciências Florestais. ESALQ/USP.

BRITO, J. O.; Estudo das influências da temperatura, taxa de aquecimento e densidade da madeira de *Eucalyptus maculatae* *Eucalyptus citriodora* sobre os resíduos sólidos da pirólise. Piracicaba, SP; agosto, 1992.

BRITO, O.J.; FERREIRA, M.; BARRICHELO, L.E.G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal.II. Densidade Básica da madeira x Densidade Aparente do carvão - Perspectivas de melhoramento. Boletim Informativo, ESALQ/USP: Piracicaba, 6(16): p.1-9, jul. 1978.

CARMO, J.S. 1988. Propriedades Físicas e Químicas do Carvão Vegetal Destinado à Siderurgia e Metalurgia. Viçosa - Minas Gerais, Brasil. (Monografia).

CARNEIRO, A. C. O. Qualidade da Madeira para produção de carvão vegetal. Treinamento carvão vegetal. Viçosa – MG, 2013.

CARNEIRO, J. da S.; CAVALCANTE, B. da S.; SILVA, M. D. de B.; SILVA, R. de S. Estudo de viabilidade do aproveitamento energético da queima de caroços de açaí produzidos no município de Castanhal-PA. *Amazônia em Foco*, v.2, p.47-63, 2013.

ÇENGEL, Y. A., & BOLES, M. A. (2006). *Thermodynamics An Engineering Approach* - 5th Edition. McGraw-Hill Book Company.

CHAVES, B. S. Potencial Energético de *Arundo donax* L. e *Phyllostachys aurea* Rivière & C. Rivière na Forma de Biocombustíveis Sólidos, *PPGEFL.DM* – ____/2020,

Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Açaí, Safra. 2015/2016. Terceiro levantamento, Setembro de 2016.

CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.S.; AYARZA, J.A.C. Biomassa no Brasil e no mundo: biomassa para energia. Campinas, SP: UNICAMP, 2008.

COSTA, Jéssica Saraiva da. Biomassa residual para uso energético no Estado do Pará. 2018. 68 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2018.

COUTO, L. C; COUTO. L; WATZLAWICK, L. F; CÂMARA, D. Vias de valorização energética da biomassa. Biomassa e Energia, v.1, n.1, p. 71-92. 2004.

CUNHA, M.P.S.C.; PONTE, C.L.F.; CRUZ, I. A.; CABRAL, M. T. F. D.; CUNHA NETO, Z.B.; BARBOSA, A.P.R. 1989. Estudo químico de 55 espécies lenhosas para geração de energia em caldeiras. In: 3º encontro Brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira: Anais, v.2, p. 93-121, São Carlos.

DOAT, J. Un nouveau produit énergétique pour les pays en développement. Le bois torréfié. In. Revue bois et forets des tropiques, n. 208, 1985. p 57–67.

FOELKEL, C. E. B. Utilização da Biomassa do Eucalipto para Produção de Calor, Vapor e Eletricidade Parte 1: Biomassa Florestal & Florestas Energéticas. In: Eucalyptus Online Book & Newsletter, 2016.

FONSECA F., F E. Torrefação de biomassa, viabilidade técnica e potencial de mercado. 2004. 137fl. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP.

GANTUSS, C. A. R. Caracterização física e química de locais de ocorrência do Açaizeiro (*Euterpe oleracea*, Mart) no Estado do Amapá e sua relação com o rendimento e qualidade do fruto. 2006. 79. f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2006.

HOMMA, A.K.O. O desenvolvimento da agroindústria no Estado do Pará. 2001. Disponível em: <http://www.cpatu.embrapa.br.br/pup_outros/rev20011213_08.pdf>. Acesso em: 25/10/2019.

IBGE. Sistema IBGE de Recuperação Automática: SIDRA. Disponível em:<<https://sidra.ibge.gov.br/home/pms/brasi>> Acesso em: 10 out 2018.

INGHAM, J. M. Biomassa no mundo e no Brasil. In: Fontes não-convencionais de energia: as tecnologias solar, eólica e de biomassa. 2. ed. Florianópolis: UFSC, 1999. 160 p.

IOANNIDOU, O.; ZABANIOTOU, A.; ANTONAKOU, E. V.; PAPZISI, K. M.; LAPPAS, A. A.; ATHANASSIOU, C. Investigating the potential for energy, fuel, materials and chemicals production from corn residues (cobs and stalks) by non-catalytic and catalytic pyrolysis in two reactor configurations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, p. 750-762, 2009.

JARA, E.R.P. O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 1989. (Comunicação Técnica, 1797).

JONES, D.L. Palms: throughout the world. Washington: Smithsonian Institution. 1995. 410p.

KOLLMANN, F.F.P.; COTÊ, W.A. Principles of wood science and technology, 2 vol. Berlin: Springer Verlag, 1968.

LIMA, E. A. de; ABDALA, E. M.; WENZEL, A. A. Influência da umidade no poder calorífico superior da madeira. Comunicado Técnico/Recomendações Técnicas - Colombo: Embrapa Florestas, 2008. Disponível em <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPF-2009-09/44878/1/com_tec220.pdf>. Acesso em 27/10/2019.

LORA, E. E. S.; GÓMEZ, Edgardo Olivares. Tecnologias de Conversão Energética da Biomassa. Disponível em: <<http://www.nest.unifei.edu.br/portugues/cursos/Files/FolderBiomassaA4.pdf>>. Acesso em: 25/10/2019;

LORENZO, E., Eletricidad solar - In genieria de los sistemas fotovoltaicos. 184p., Progenssa-Sevilha, Espanha, 1994.

LOUREIRO, B. A., MELO, M., OLIVEIRA, I., A. F. TRUGILHO, P. (2021). Rendimento gravimétrico da carbonização e caracterização qualitativa do carvão vegetal

em clones de híbridos de *Corymbia* Spp. para uso industrial. *Ciencia Florestal*. 31. 214-232.

LUCZYNSKI, E; BAHIA, R. R. Requisitos de Reservas Petrolíferas para as Alternativas de Cenários e Matrizes Energéticas - Brasil 2000/2030. T & N Petróleo, Rio de Janeiro, n. 42, p. 98-112, 2006;

MAGALHÃES, E. A. Desenvolvimento e análise de uma fornalha para aquecimento direto e indireto de ar utilizando biomassa polidispersa. 2007. 213 f. Tese (Doutorado em Ciências), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

MORAIS, S. A. L. de, NASCIMENTO, E. A. do, MELO, D. C. de. Análise da madeira *Pinus oocarpa* parte 1 – estudo dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis. *Revista Árvore*. v. 29, n. 3, p. 461-470, 2004.

NAGAISHI, T. Y. R. Açaí (*Euterpe oleracea* Mart): extrativismo, características, energia e renda em uma comunidade na ilha de Marajó/PA. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais. Universidade Federal Rural da Amazônia. Belém. 2007.

NASCIMENTO S.M. , R.I.J.P. DUTRA, S. NUMAZAWA. Resíduos de Industria Madeireira: Caracterização, consequências sobre o meio ambiente e opções de uso. *Holos Environ*, 6 (1) (2006), pp. 8-21

NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T de P.; TRUGILHO, P. T.; et al. Qualidade da madeira de clones de *Eucalyptus* em diferentes idades para a produção de bioenergia. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 56, n. 2, p. 139-148, 2013.

NOGUEIRA, L. A. H. Eficiência energética no Uso de Vapor. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005a.

NOGUEIRA. M. F. M. Biomassa Energética: Caracterização da Biomassa. Palestra Proferida na I Escola de Combustão, Florianópolis – SC 2007.

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; et al. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* f. Muell. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 38, n. 37, p. 431-439, 2010.

OLIVEIRA, J.V. - Análise econômica do carvão vegetal. In: Seminário sobre Carvão Vegetal, 1, 1977. Belo Horizonte, IBS/ABM/BDMG, 1977.

PASSINHO, M. S., BARBOSA, D., SOUZA, M. J., & XAVIER, N. (2019). Uso da semente de açaí como alternativa energética na indústria de beneficiamento de polpa de açaí. *Enciclopédia Biosfera*, 16(29).

PERA, H. Geradores de vapor: um compêndio sobre a conversão de energia com vistas à preservação da ecologia. São Paulo: Fama, 1990.

PÉREZ, N. P.; DENTELLO, R.O.; MACHIN, E. B.; PEDROSO, D. T.; ANTUNES, J. S.; SILVEIRA, J. L. Physical characterization of bagasse for use in fluidized bed Gasifiers associated with gas turbines in sugar cane industry. In: The XilatinAmerican Congress Electricity Generation and Transmission - CLAGTEE 2015.

PETROFF, G. & DOAT, J.: Pirolyse des bois tropicaux – Influence de la composition chimique de bois sur les produits de distillation. *Revue Bois et Forêts des tropique* Nojent sur Marn/France. Centre Technique Forestier Tropical – CTFT. 177:51 – 64. Já./fev., 1978.

PIMENTA, A. S.; BARCELLOS, D. C. Como produzir carvão para churrasco. Viçosa, MG. 76p. 2000.

PINHEIRO, G. F.; RENDEIRO, F.; PINHO, J. T. Densidade energética de resíduos vegetais. *Biomassa & Energia*, Viçosa, v. 2, n. 1, p. 113-123, jan./mar. 2005.

PRINS, M. J.; PTASINSKI, K. J.; JANSSEN, F. J. J. G. Torrefaction of wood: part 2. analysis of products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Amsterdam, v. 77, p. 35-40, 2006.

PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; MENDES, R. F.; RIBEIRO, M. X.; TRUGILHO, P. F.; LEITE, E. R. S. Torrefação e carbonização de briquetes de resíduos do processamento dos grãos de café. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 16, n. 11, p.1252-1258, 2012c. DOI: 10.1590/S1415-43662012001100015

QUEIROZ, A. L. de. Guia prático de manejo florestal para produção de frutos de andiroba (*Carapa guianensis Aulb.*) e de outros produtos de valor econômico no estado do Amapá. Macapá: IEPA, 2007, 38p.

QUIRINO, W.F. Utilização Energética de Resíduos Vegetais. Brasília: LPF/IBAMA,

2003.

RODRÍGUEZ-ZÚÑIGA, U. F.; LEMO, V.; FARINAS, C. S.; BERTUCCI NETO; COURI, S. Evaluation of agroindustrial residues as substrates for cellulolytic enzymes production under solid state fermentation. In: ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE PESQUISA EM MATERIAIS - SBPMat, 7., 2008, Guarujá; BRAZILIAN MRS MEETING, 7., 2008, Guarujá. Abstracts. Rio de Janeiro: SBPMat, 2008.

ROWELL, R. M.; LEVAN-GREEN, S.L. Thermal Properties. . In: Handbook of wood chemistry and wood composites. Rowell, R. M. (ed) Boca Raton, Florida: CRC, 2005. P 121 – 138.

SANTOS, G. R. Torrefação da biomassa proveniente de resíduos do cacau (theobroma cacao l.) para produção de biocombustível sólido no estado da bahia. Anais CONEPETRO... Campina Grande: Realize Editora, 2015. Disponível em: <<https://www.editorarealize.com.br/index.php/artigo/visualizar/10419>>. Acesso em: 18/03/2021

SEYE, O.; Souza, R. C. R.; Bacellar, A. A.; Morais, M. R. Caracterização do caroço de açaí como insumo para geração de eletricidade via gaseificação. In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ENERGIA NO MEIO RURAL, 7, 2008. Anais... Fortaleza, 2008.

SILVA, A. P.; ANDRADE, A. M.; DIAS, A. F. Investigando o uso de resíduos do processamento da madeira de eucalipto para a produção de combustíveis sólidos compactados. Matéria (Rio J.) [online]. 2020, vol.25, n.3 [cited 2021-05-07], e-12797.

SILVA, E. K. Avaliação do uso de moinha de carvão na compostagem de lodo de esgoto e caroço de açaí para o cultivo de milho (*Zea mays L.*), 2014

SILVA, I. T.; ALMEIDA, A. C.; MONTEIRO, H. A.; SILVA, I. M. O.; ROCHA, R. P. R.. 2004. Uso do Caroço de Açaí como Possibilidade de Desenvolvimento Sustentável do Meio Rural, da Agricultura Familiar e de Eletrificação Rural no Estado do Pará.in E. Meio, editor.

SILVEIRA, E. A.; MORAIS, M. V. G.; ROUSSET, P.; CALDEIRA-PIRES, A.; PÉTRISSANS, A.; GALVÃO, L. G. O. Coupling of an acoustic emissions system to a

laboratory torrefaction reactor. In: *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 129, p. 29-36, 2017

SOARES, V. C., BIANCHI, M. L., TRUGILHO, P. F., PEREIRA, A. J., HÖFLER, J.. (2014). Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. *Revista Árvore*, 38(3), 543-549.

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; HÖFLER, J.; PEREIRA, A. J. Análise das propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto em três idades. *Cerne, lavras*, v. 21, n. 2, p. 191-197, 2015.

STAISS, C. PEREIRA, H. Biomassa: energia renovável na agricultura e no sector florestal. *AGROS*, n. 1. p. 21-30, 2001. TABACNIKS, M. H (2003), Instituto de Física da Universidade de São Paulo. Edição: Shila e Giuliano S. Olguin. São Paulo, 2003;

VALE, A. T. ; MENDES, R. M.; AMORIM, M. R. S. DANTAS, V. F. S. Potencial energético da biomassa e carvão vegetal do epicarpo e da torta de pinhão manso (*Jatropha curcas*). *CERNE* [online]. 2011, vol.17, n.2 [cited 2021-04-15], pp.267-273.

WANG, L.; WELLER, C.L.; JONES, D.D.; HANNA, M.A. Contemporary issues in thermal gasification of biomass and its application to electricity and fuel production, *Biomass and Bioenergy*, v. 32, pp. 573–581, 2008.

WELFLE, A. Balancing growing global bioenergy resource demands-Brazil's biomass potential and the availability of resource for trade. *Biomass and Bioenergy*, v. 105, p. 83-95. 2017

WENCESLAU, F. F. PROINFA: Uma contribuição para a diversificação da matriz energética no Rio Grande do Sul. 2013. 168 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional) - Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2013.

WENZL, H. F. J. The chemical technology of wood. Academic Press: New York. 1970. 692 p.

WERTHER, J., SAENGERA M., HARTGEA E. U., OGADA T., SIAGIB Z. Combustion of agricultural residues. *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 26, p. 1-27, 2000.