



UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS  
CAMPUS DE PALMAS TOCANTINS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROENERGIA

**ASTROGILDO PIRES BERNARDO**

**ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS  
DE BIOMASSA PROVENIENTE DA MANUTENÇÃO DA  
REDE DE ENERGIA DA CONCESSIONÁRIA ENERGISA  
TOCANTINS**

Palmas – TO  
2022

ASTROGILDO PIRES BERNARDO

**ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS  
DE BIOMASSA PROVENIENTE DA MANUTENÇÃO DA  
REDE DE ENERGIA DA CONCESSIONÁRIA ENERGISA  
TOCANTINS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Tocantins (UFT), Campus Universitário de Palmas, Programa de Pós-Graduação em Agroenergia como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Agroenergia.

Orientador: Professor Dr. Juan Carlos Valdés Serra.

Palmas – TO  
2022

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins**

---

B523a Bernardo, Astrogildo Pires.

Análise do Potencial Energético dos Resíduos de Biomassa Proveniente da Manutenção da Rede de Energia da Concessionária ENERGISA Tocantins. / Astrogildo Pires Bernardo. – Palmas, TO, 2023.

72 f.

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus Universitário de Palmas - Curso de Pós-Graduação (Mestrado) em Agroenergia, 2023.

Orientador: Juan Carlos Valdés Serra

Coorientador: Alison Moreira da Silva

1. Resíduos de Biomassa. 2. Poda de árvores. 3. Biomassa compactada. 4. Biquetes. I. Título

**CDD 333.7**

---

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

**Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).**

**ASTROGILDO PIRES BERNARDO**

**ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS DE  
BIOMASSA PROVENIENTE DA MANUTENÇÃO DA REDE DE  
ENERGIA DA CONCESSIONÁRIA ENERGISA TOCANTINS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Tocantins (UFT), Campus Universitário de Palmas, Programa de Pós-Graduação em Agroenergia para obtenção do título de Mestre em Agroenergia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Data de aprovação: \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_ .

Banca Examinadora

---

Prof. Dr. Juan Carlos Valdés Serra – PPGA/UFT (Presidente e Orientador)

---

Prof. Dr. Joel Carlos Zukowski Junior – PPGA/UFT (Examinador Interno)

---

Prof. Dr. Ananias Francisco Dias Júnior – LEB/UFES (Examinador Externo)

Palmas – TO  
2022

*Dedico esse trabalho a Deus, que nos criou e foi criativo nesta tarefa. Seu fôlego de vida em mim, me foi sustento e me deu coragem para questionar realidades e propor sempre um novo mundo de possibilidades.*

*“Se vi mais longe foi por estar sobre os ombros de gigantes”. (Isaac Newton).*

## AGRADECIMENTOS

Esse Trabalho não seria possível sem o apoio direto ou indireto de diversas pessoas. Por isso, não tem como não ser grato:

A Deus por ter me criado, aprimorado e sustentado com esperança, força e fé até mesmo nos momentos mais difíceis e, sobretudo por me contemplar com pessoas que me apoiaram, ajudaram e incentivaram nos momentos mais desafiantes.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agroenergia (PPGA/UFT), seu corpo docente, coordenação e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior, constituído pela aprimorada confiança no mérito e ética aqui presentes.

Ao meu orientador Professor Dr. Juan Carlos Valdés Serra, pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas inspirações, correções e incentivos.

Ao Professor Ananias Francisco Dias Júnior (UFES) por ter viabilizado a minha pesquisa, disponibilizando o Laboratório de Energia da Biomassa da Universidade Federal do Espírito Santo (LEB/UFES) juntamente com seu corpo técnico. Gratidão pelos ensinamentos, pela amizade e por ser tão bem-humorado e prestativo em ajudar o próximo.

Ao Álison Moreira da Silva (USP) por compartilhar seus conhecimentos, por me dar todo apoio na condução dessa pesquisa, pela disponibilidade diuturnamente do seu tempo e pela amizade.

A todos os Alunos e profissionais do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira (LEB/DCFM), Jerônimo Monteiro/Espírito Santo/Brasil pela acolhida durante a pesquisa, pelos ensinamentos e pela amizade.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Agroenergia (PPGA/UFT) por me proporcionar o conhecimento, não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional.

A Jesus Cristo, aos Orixás sagrados da Umbanda, aos Mentores da Casa de Caridade Anjos da Luz (CCAL) em especial, Mãe Luanda, e a Mãe Celina, por abrir as portas para meu desenvolvimento mediúnico e dar suporte para a prática dos atributos da fé.

A minha esposa Francimara Pereira Batista e minha filha Emanuela Pereira Bernardo por me proporcionar amor e constituir comigo uma família e um lar, inspiração que não me deixa desistir de ser melhor, sempre.

Aos meus pais José Lázaro Bernardo e Helena Pires Bernardo, juntamente com todos os meus Irmãos pela criação, educação, respeito, guarida e o maior tesouro de todos, a honestidade.

Aos Amigos do Programa de Pós-Graduação em Agroenergia (PPGA/UFT) por fazer esse ambiente acadêmico mais criativo e amigável e, que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação e vão continuar presentes em minha vida com certeza, o meu muito obrigado.

Agradeço a todos que fazem e fizeram parte da minha vida, de alguma forma vocês me ajudaram e incentivaram a minha jornada, obrigando-me a concluir que, por todos vocês, valeu a pena o sentimento do dever cumprido.

## RESUMO

Atualmente as biomassas provenientes de resíduos vem ganhando importância no cenário energético em diversos países. Biocombustíveis provenientes de biomassa por meio de abordagens ecologicamente corretas estão recebendo atenção de pesquisadores e cientistas em todo o mundo. Este trabalho de pesquisa realiza a caracterização física, mecânica, química e térmica, de briquetes produzidos a partir de resíduos de biomassa, provenientes dos trabalhos de manutenção das Redes de distribuição de energia Elétrica no Estado do Tocantins. Foram coletadas amostras de biomassa de três espécies mais frequentes na manutenção das redes elétricas em todo o Estado do Tocantins, são elas: *Licania tomentosa* Benth. *Fritsch* (Oiti), *Mangifera indica* L. (Manga) e *Azadirachta indica* (Neem-indiano). A produção dos briquetes e os ensaios físicos, químicos, e energéticos foram realizados com particularidades de estudo laboratorial. As formulações analisadas foram: Oiti Sem Folhas (OSF), Neem Sem Folhas (NSF), Manga Sem Folhas (MSF), Oiti Com 50% de Folhas (OCF), Neem Com 50% de Folhas (NCF) e Manga Com 50% de Folhas (MCF). Para os ensaios da biomassa foram estimadas a umidade do material, teor de materiais voláteis, teor de cinzas, carbono fixo, poder calorífico superior, inferior e útil, lignina, extrativos, holocelulose e densidade a granel. Para os ensaios dos briquetes foram estimadas a densidade aparente, estabilidade dimensional, dureza mecânica, resistência à tração por compressão diametral, taxa de compactação, colorimetria, densidade energética e ganho de umidade. Os resultados obtidos denotam que o poder calorífico superior dos briquetes com folha e sem folha encontram-se com valores médios de 19,32 e 19,45 MJ/kg respectivamente. Os briquetes contendo adição de folhas contém elevados teores de cinzas e em compensação, possui um elevado teor de extrativos e lignina, observa-se um equilíbrio no poder calorífico frente aos briquetes sem a adição de folhas. Conclui-se, depois dos resultados obtidos, que os briquetes produzidos a partir dos resíduos de poda de árvore atendem aos requisitos exigidos na literatura para aproveitamento energético.

**Palavras-chaves:** Resíduos de Biomassa. Biocombustíveis Sólidos. Biomassa compactada. Briquetes. Poda-de-árvores.



## ABSTRACT

Currently, biomass from waste is gaining importance in the energy scenario in several countries. Biofuels sourced from biomass through eco-friendly approaches are getting attention from researchers and scientists around the world. This research work performs the physical, mechanical, chemical and thermal characterization of briquettes produced from biomass residues, resulting from maintenance work on the electricity distribution networks in the State of Tocantins. Biomass samples were collected from the three most frequent species in the maintenance of electrical networks throughout the State of Tocantins, they are: *Licania tomentosa Benth. Fritsch* (Oiti), *Mangifera indica L.* (Mango) and *Azadirachta indica* (Neem-Indian). The production of briquettes and the physical, chemical, and energy tests were carried out with laboratory study particularities. The formulations avoided were: Oiti Without Leaves (OSF), Neem Without Leaves (NSF), Mango Without Leaves (MSF), Oiti with 50% Leaves (OCF), Neem with 50% Leaves (NCF) and Mango with 50% of Leaves (MCF). For the biomass tests, the material moisture, volatile material content, ash content, fixed carbon, higher, lower and useful calorific value, lignin, extractives, holocellulose and bulk density were estimated. For the briquettes tests, apparent density, dimensional stability, mechanical hardness, tensile strength by diameter, compaction rate, colorimetric, energy density and moisture gain were estimated. The results obtained denote that the higher calorific value of briquettes with and without leaves have average values of 19.32 and 19.45 MJ/kg respectively. The briquettes containing the addition of leaves contain high levels of ash and, in compensation, have a high content of extractives and lignin, observing a balance in the calorific value compared to the briquettes without the addition of leaves. It is concluded, after the results obtained, that the briquettes produced from tree pruning residues meet the requirements demanded in the literature for energy use.

**Key words:** Biomass Residues. Solid Biofuels. Compacted biomass. briquettes. Tree pruning.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Oferta interna de Energia – Brasil 2021.....	20
Figura 2 – Briquete de resíduo madeireiro .....	21
Figura 3 – Fluxograma simplificado do processo de briquetagem.....	22
Figura 4 – Mapa eletrogeográfico do Estado do Tocantins.....	29
Figura 5 – Roteirização das análises laboratoriais.....	32
Figura 6 – Processo de análise química estrutural LEB/UFES .....	35
Figura 7 – Bomba calorimétrica IKA C200 .....	37
Figura 8 – a) cadinho inserido na estrutura em contato com o filamento e b) Recipiente contendo a amostra preparado para ser inserido na bomba calorimétrica.....	37
Figura 9 – Briquetadeira BL-32 LIPPEL .....	39
Figura 10 – a) Teste de dureza na superfície do briquete e b) teste de dureza na lateral do briquete .....	41
Figura 11 – Máquina universal de ensaios .....	42
Figura 12 – Espectrofotômetro CM-2600D KONICA MINOLTA.....	43
Figura 13 – Esquema tridimensional de cor CIELab .....	44
Figura 14 – Poda, trituração e coleta de na Quadra 204 Sul em Palmas .....	47
Figura 15 – Poda de um Oiti na Quadra 210 Sul em Palmas .....	49
Figura 16 – Poda de uma mangueira na Quadra 204 Sul em Palmas.....	50
Figura 17 – Poda de um Neem na Quadra 204 Sul em Palmas .....	50
Figura 18 – Densidade a Granel média (DG) dos resíduos moídos de podas de árvore .....	51
Figura 19 – Materiais voláteis (MV), teor de cinza (CZ) e de carbono fixo (CF) da biomassa .....	52
Figura 20 – Análise química estrutural: Total de Lignina, Teor de Extrativos e Teor de Holocelulose .....	54
Figura 21 – Teor de umidade (U), poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico útil (PCU) dos resíduos de Biomassa .....	55
Figura 22 – Matriz de correlação de Pearson para as variáveis da biomassa.....	56
Figura 23 – Densidade Aparente dos Briquetes (DA).....	57
Figura 24 – Densidade Energética dos Briquetes (DA) .....	58
Figura 25 – Resistência à Compressão (RTCD), Expansão Volumétrica (EV) e Dureza Mecânica (DM) dos Briquetes.....	59
Figura 26 – Matriz de correlação de Pearson para as variáveis dos briquetes .....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais características dos briquetes .....	23
Tabela 2 – Teor de Umidade e análise química imediata briquetes .....	25
Tabela 3 – Valores energéticos dos briquetes .....	26
Tabela 4 – Estimativa de biomassa gerada na Energisa Tocantins no período de 2021 .....	48
Tabela 5 – Estimativa de biomassa gerada na Energisa Tocantins no período de 2021 .....	49
Tabela 6 – Preço dos equipamentos industriais para usina de briquetes .....	62
Tabela 7: Estimativa de investimento inicial para implantação das tecnologias.....	63
Tabela 8: Capacidade produtiva da usina de briquetes.....	64
Tabela 9: Estrutura custo operacional para o tratamento de 9.400 ton/ano de resíduos.....	65
Tabela 10: Indicadores técnico-econômicos da Usina de briquetes.....	65
Tabela 11: Estimativa da quantidade de biomassa (ton/mês), equivalente em MJ/kg/mês e equivalente em MWh/mês.....	66

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
AT	Alta Tensão
BEN	Boletim Energético Nacional
BT	Baixa Tensão
CIELab	Comissão Internacional de Iluminação
CF	Carbono Fixo
DA	Densidade Aparente
DE	Densidade Energética
DIN	Deutsches Institut für Normung
GA	Grau de Alavancagem
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETO	Energisa Tocantins
ESALQ	Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz
LEB	Laboratório de Energia da Biomassa
LO	Lucro Operacional
MCF	Manga Com folhas
MSF	Manga Sem Folhas
MT	Média Tensão
MV	Materiais Voláteis
NBR	Norma Brasileira
NCF	Neem Com Folgas
NS	Norte-Sul
NSF	Neem Sem Folhas
OIE	Oferta Interna de Energia
OCF	Oiti Com Folhas
OSF	Oiti Sem Folhas
PCS	Poder Calorífico Superior
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCU	Poder Calorífico Útil
PE	Ponto de Equilíbrio Operacional
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PPGCFL	Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais
PPGA	Programa de Pós-Graduação em Agroenergia
RB	Receita Bruta
RPU	Resíduos de Poda Urbana
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
TAPPI	Technical Association of the Pulp and Paper Industry
CZ	Teor de Cinzas
U	Umidade
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
UFT	Universidade Federal do Tocantins
USP	Universidade de São Paulo

## LISTA DE SÍMBOLOS

a	Coordenada vermelho-verde
b	Coordenada azul-amarelo
Bar	Pressão
Cm <sup>3</sup>	Centímetro Cúbico
cm <sup>2</sup>	Centímetro Quadrado
G	Grande
G	Gramas
°C	Grau Celsius
kcal	Quilocaloria
kWh	Quilowatt-hora
kg	Quilograma
kJ	Quilojoule
kN	Quilonewton
L	Mensuração da Claridade
m <sup>2</sup>	Metro Quadrado
μm	Micrômetro
mm	Milímetro
mm <sup>3</sup>	Milímetro Cúbico
<i>M<sub>i</sub></i>	Massa inicial úmida
<i>M<sub>f</sub></i>	Massa final seca
MJ	Mega-Joule
M	Médio
<i>Mesh</i>	Malha
N	Newton
<i>V<sub>i</sub></i>	Volume inicial
<i>V<sub>f</sub></i>	Volume final
%	Porcentagem

## Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.2 OBJETIVOS .....	17
1.2.1 Objetivo Geral .....	17
1.2.2 Objetivos Específicos .....	17
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>18</b>
2.1 POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS .....	18
2.2 CONFLITO ENTRE A REDE ELÉTRICA E A ARBORIZAÇÃO.....	19
2.3 PARTICIPAÇÃO DE FONTES RENOVÁVEIS NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA.....	19
2.4. BIOMASSA COMPACTADA BRIQUETES .....	21
2.5. POTENCIAL FONTE DE BIOMASSA PARA PRODUÇÃO DE BRIQUETES .....	23
2.6 PROPRIEDADES FÍSICAS, QUÍMICAS E ENERGÉTICAS DOS BRIQUETES .....	24
<b>3- MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>29</b>
3.1 ESTIMATIVA DO RESÍDUO DE PODA URBANA.....	30
3.2 ESTIMATIVA DAS ESPÉCIES DE ARVORES EM CONFLITO COM A REDE ELÉTRICA.....	31
3.3 COLETA E PREPARO DA BIOMASSA PARA ANÁLISES LABORATORIAIS .....	31
3.4 PLANEJAMENTO ESTATÍSTICO DA PESQUISA .....	31
3.5 ANÁLISE LABORATORIAL DA BIOMASSA .....	32
3.5.1 Granulometria média .....	33
3.5.2 Densidade a granel.....	33
3.5.3 Análise química imediata: Materiais Voláteis (MV), Teor de Cinzas (CZ) e Carbono Fixo (CF) .....	33
3.5.4 Análise química estrutural (Lignina, Extrativos e Holocelulose).....	35
3.5.5 Umidade .....	36
3.5.6 Poder calorífico.....	36
3.6 Produção dos briquetes.....	38
3.7 ANÁLISE LABORATORIAL DOS BRIQUETES .....	40
3.7.1 Densidade aparente dos briquetes .....	40
3.7.2 Expansão Volumétrica dos Briquetes.....	40
3.7.3 Dureza mecânica.....	41

3.7.4 Resistência à Tração por Compressão Diametral .....	41
3.7.5 Taxa de compactação.....	42
3.7.6 Colorimetria.....	43
3.7.7 Densidade energética.....	44
3.7.8 Ganho de umidade .....	44
3.8 Análise preliminar de uma usina de briquetes.....	45
3.9 Análise de dados .....	46
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>47</b>
4.1 ESTIMATIVA DE BIOMASSA PRODUZIDA NO ANO DE 2021 .....	47
4.2 ESTIMATIVA DAS ESPÉCIES DE ÁRVORES MAIS FREQUENTES NA ARBORIZAÇÃO URBANA .....	48
4.3 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA .....	51
4.3.1 Classificação granulométrica.....	51
4.3.2 Densidade a Granel.....	51
4.3.3 Análise Química Imediata .....	52
4.3.4 Análise Química Estrutural .....	53
4.3.5 Poder Calorífico.....	55
4.3.6 Matriz de Correlação da Caracterização da Biomassa .....	56
4.4 CARACTERIZAÇÃO DOS BRIQUETES .....	57
4.4.1 Densidade Aparente dos Briquetes.....	57
4.4.2 Densidade Energética dos Briquetes .....	58
4.4.3 Resistências Mecânicas, Expansão Volumétrica e Dureza Mecânica dos Briquetes... ..	59
4.4.4 Colorimetria dos Briquetes.....	60
4.4.5 Matriz de Correlação da Caracterização dos Briquetes.....	61
4.5 ANÁLISE PRELIMINAR DE UM CENTRO DE PROCESSAMENTO DE BIOMASSA (BRIQUETES).....	61
4.5.1 Capacidade de Produção.....	62
4.5.2 Custo com manutenção.....	63
4.6 ESTIMATIVA DE ENERGIA GERADA PELOS RESÍDUOS DE BIOMASSA.....	66
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>67</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>68</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A biomassa é uma das fontes renováveis de energia com maior potencial de crescimento nos próximos anos. Tanto para o Brasil quanto para o mundo ela é considerada uma das principais alternativas para diversificação da matriz energética e a consequente redução da dependência dos combustíveis fósseis (ANEEL, 2020). De acordo com Tenorio *et al.*, (2015) a biomassa é uma fonte alternativa cuja missão é produzir um produto limpo e renovável, o que contribui para redução da emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE).

Biocombustíveis provenientes de biomassa por meio de abordagens ecologicamente corretas estão recebendo atenção de pesquisadores e cientistas em todo o mundo. Atualmente, vários biocombustíveis sólidos, líquidos e gasosos (por exemplo, biodiesel, etanol, biogás, carvão vegetal, pellets e briquetes) são produzidos a partir de biomassas, esses biocombustíveis têm mostrado grande potencial para alcançar a segurança energética de forma sustentável (AMBAYE *et al.*, 2021).

Diversos tipos de biomassa, podem ser utilizados como matéria-prima para suprir as modernas cadeias produtivas de energia, gerando calor e eletricidade. Todavia, a principal fonte de matéria-prima vem das atividades agrícolas e florestais. A biomassa residual desses setores possuem baixo valor comercial e produz um biocombustível de excelente qualidade, devido ao considerável poder calorífico e baixo teor de cinza (SILVA *et al.*, 2022; WOLF; VIDLUND; ANDERSSON, 2006). Os pesquisadores Passaglia; Coelho; Anater, (2022) contribuem ao ressaltar que a biomassa residual oriunda da manutenção de podas de árvores apresentam aptidão para o aproveitamento energético.

A atividade de distribuição de energia elétrica por meio de Redes de Distribuição Aéreas (RDA) é altamente geradora de resíduos florestais, tendo em vista a poda da arborização junto a RDA. A manutenção preventiva e corretiva faz parte do calendário de manutenção das concessionárias para manter os indicadores de qualidade do fornecimento de energia elétrica: confiabilidade, conformidade e presteza. O problema é que apenas uma parcela do volume dos resíduos das podas de árvores geradas possui algum aproveitamento econômico, social e ambiental (RIBASKI, 2019).

A deficiente gestão dos resíduos oriundos das podas de árvores tem acarretado altos custos para a Concessionárias de Energia Elétrica e para os municípios, pois além dos problemas ambientais causados, também comprometem grandes áreas para disposição e alto custo com transporte. Em face da carência de novas áreas para implantação de depósitos de



resíduos, o tratamento adequado deste insumo pode ser a solução para mitigar a quantidade de resíduos e, com isso reduzir a pressão exercida ao meio ambiente (SILVA, 2016).

O principal problema da utilização dos resíduos de poda de árvores para geração de energia é a baixa densidade energética. Uma forma eficaz de solucionar esse problema é a compactação da biomassa, ou seja, produção de materiais sólidos de tamanho médio com alta concentração de energia, os quais são denominados briquetes. Os briquetes são biocombustíveis à base de biomassa vegetal moída e compactada sob pressão. O resultado é um produto de alta densidade energética e boa resistência mecânica (GARCIA *et al.*, 2018).

Após análise detalhada sobre a gestão da manutenção das podas de árvores junto às RDA da empresa Energisa Tocantins (ETO), seus principais alimentadores e indicadores de qualidade, verificou-se a viabilidade técnica e econômica em caráter preliminar, do projeto de geração de energia térmica através deste insumo.

O objetivo deste trabalho foi analisar o potencial energético da biomassa proveniente da manutenção da Rede de Distribuição da empresa Energisa Tocantins e produzir briquetes deste resíduo. Analisar as características físicas, químicas e energéticas da biomassa e dos briquetes. Sobretudo uma análise preliminar de viabilidade para propor a construção de uma usina de briquetes.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Analisar o potencial energético dos Resíduos de Biomassa descartados, provenientes dos trabalhos de Manutenção das Redes de Distribuição de energia elétrica no Estado do Tocantins.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- a) Estimativa do volume estéreo de biomassa descartada nas 20 maiores cidades do Estado, pela Energisa Tocantins nos últimos 12 meses;
- b) Estimativa das espécies mais conflitantes com a rede elétrica nas vinte maiores cidades do Estado e escolha de três espécies para serem analisadas;
- c) Análise e caracterização física, química e energética da biomassa selecionada;
- d) Produção e caracterização física, química e energética dos briquetes em duas condições de temperatura;
- e) Análise preliminar de viabilidade técnica e econômica para construção de uma usina de briquetes. Quantidade estimada de energia térmica e elétrica gerada com este resíduo.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Política Nacional de Resíduos Sólidos

Atualmente, 2,01 bilhões de toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) são geradas anualmente no mundo. O Brasil, durante o ano de 2021, gerou 70 milhões de toneladas de RSU, dentre eles estão os Resíduos de Poda Urbana (RPU), que possuem alto potencial de aproveitamento. (PASSAGLIA; COELHO; ANATER, 2022). A Lei Federal nº 12.305/2010 institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que propõe a redução da geração de resíduos e o aumento da reciclagem e da reutilização desses materiais. Há uma exigência legal para que os estados e municípios brasileiros promovam diferentes ações para viabilizar a destinação correta de todos os materiais descartados pelas empresas públicas, privadas e população (RAMOS, 2021).

As metas criadas pela Lei vão desde a proposta de eliminação dos lixões até a instituição de instrumentos de planejamento a nível nacional, estadual e municipal, e a imposição da elaboração de um plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos. Isso coloca o Brasil em um nível de igualdade com países mais desenvolvidos. Há também o estabelecimento de uma logística reversa dos resíduos, que atribui parte da responsabilidade às empresas. Por meio do reaproveitamento e da inserção dos resíduos em outros ciclos produtivos, as empresas se desenvolvem nos setores econômicos e de responsabilidade ambiental e social (RAMOS, 2021).

O desenvolvimento de um sistema de gestão integrada de resíduos parte da premissa do desenvolvimento sustentável ao qual garante a sinergia entre o desenvolvimento econômico, social e ambiental. Cria-se portando a perspectiva da economia circular com implementação da hierarquia dos resíduos na ordem de prioridade: prevenção, reutilização reciclagem, recuperação de energia ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes (COSENZA *et al.*, 2021)

A Lei nº 12.305 contempla as principais diretrizes de sustentabilidade e entre seus princípios e instrumentos destacam-se a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida do produto e pela logística reversa, elos essenciais para viabilizar a reintegração de resíduos em um novo ciclo econômico (COSENZA *et al.*, 2021). Todavia, a gestão adequada dos Resíduos de Poda Urbana, a partir da manutenção das Rede de Distribuição da ETO, contribui para evitar danos ou riscos à segurança e à saúde pública, e a minimizar os impactos ambientais adversos (PNRS, 2022)

## 2.2 Conflito entre a Rede Elétrica e a arborização

A arborização faz parte da infraestrutura dos municípios, proporcionando uma série de serviços ambientais importantes para a qualidade de vida da população. No entanto, também pode gerar conflitos com a rede elétrica, devendo ser implantada seguindo um planejamento, visando aumentar os benefícios e diminuir seus danos (TORRES *et al.*, 2021). A convivência satisfatória entre as árvores e a rede elétrica depende da manutenção periódica de podas dos galhos, a fim de diminuir as interrupções no fornecimento de energia elétrica. O gerenciamento eficaz da vegetação ao redor das linhas de distribuição de energia elétrica é essencial para a preservação da segurança pública, do meio ambiente e da confiabilidade da rede elétrica (ENERGISA, 2018).

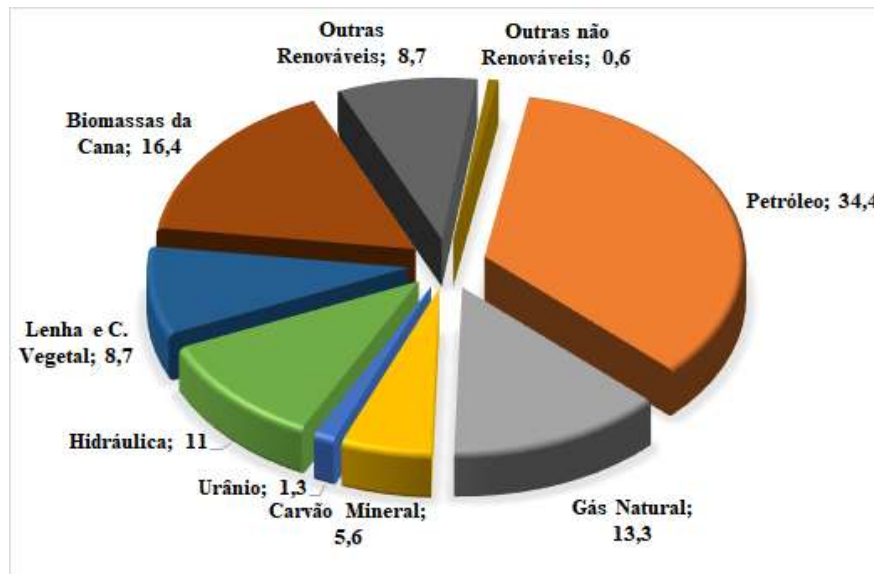
Os Resíduos de Poda Urbana (RPU) geram volume expressivo de biomassa, causando sério problema na hora de seu descarte, por não aceitar compactação, ocupa maior volume, consumindo espaço útil do aterro sanitário, reduzindo sua capacidade e ampliando seus custos operacionais. Dessa forma a destinação dos resíduos não se mostra sustentável e adequada, pois não permite o aproveitamento do potencial contido na biomassa vegetal (SILVA, 2016).

Portanto, a gestão eficaz dos resíduos de poda junto as Rede Distribuição da Energisa Tocantins (ETO) visa contribuir com o combate à poluição contribuindo com balanço energético positivo com a diminuição dos resíduos, tendo a energia térmica e energia elétrica a função eliminar parte do problema dos resíduos sólidos, visando, contudo, a geração distribuída (ENERGISA, 2021). Contribui sobretudo para redução da dependência dos combustíveis fósseis e incrementa a participação das fontes renováveis de energia na matriz energética brasileira de forma sustentável.

## 2.3 Participação de fontes renováveis na matriz energética brasileira

De acordo com o Boletim Energético Nacional (BEN) ano 2022 com base em 2021, a participação de fontes renováveis na matriz energética brasileira está entre as maiores do mundo: 44,7% da energia produzida no país vêm de fontes renováveis de energia (biomassa, hidráulica, lenha, carvão vegetal e outros), valor três vezes superior à média mundial, que é de aproximadamente 14,1%. A Figura 1 expressa graficamente a Oferta Interna de Energia (OIE) no Brasil em 2021 (EPE, 2022a).

Figura 1 – Oferta interna de Energia – Brasil 2021



Fonte: Adaptado de (EPE, 2022a)

Segundo o Atlas de Energia Elétrica do Brasil, a biomassa é uma das fontes de produção de energia com maior potencial de crescimento. Ela é apontada como alternativa para a diversificação da matriz energética mundial. A agricultura representa 33% do potencial energético da biomassa no Brasil, enquanto as atividades florestais correspondem a 65%. O bagaço de cana e os resíduos florestais apresentam grande potencial para geração de energia elétrica. Entretanto, algumas biomassas não têm grande aplicação, devido a custos logísticos de coleta e transformação (EPE, 2020).

A quantidade de biomassa produzida no Brasil é expressiva em função da abundância de recursos naturais e da aptidão agrícola do país. Contudo, os resíduos de biomassa gerados nas atividades agroflorestais ainda são subutilizados (MORAES *et al.*, 2017). Dessa forma, a biomassa produzida necessita de avaliações mais precisas quanto ao seu potencial de utilização energético.

O potencial energético de cada uma dessas fontes citadas depende da tecnologia utilizada no processamento para obtê-lo. Segundo o Centro Nacional de Referência em Biomassa, é possível classificar a obtenção da energia da biomassa em duas categorias principais: *i)* tradicional, obtida por meio de combustão direta de madeira, lenha, resíduos agrícolas, resíduos de animais e urbanos, para cocção, secagem e produção de carvão; ou *ii)* moderna, obtida por meio de tecnologias avançadas de conversão, como pirólise de biomassa, geração de eletricidade por meio do gás de síntese ou na produção de biocombustíveis sólidos por adensamento (CENBIO, 2020).

O principal problema da utilização de resíduos agrícolas e florestais para geração de energia é a baixa densidade energética. Uma forma eficaz de solucionar esse problema é a compactação da biomassa, ou seja, produção de materiais sólidos de tamanho médio com alta concentração de energia, os quais são denominados pellets ou briquetes (DA SILVA *et al.*, 2015).

#### 2.4. Biomassa compactada briquetes

Existem várias técnicas disponíveis para realizar a compactação ou densificação da biomassa. Os processos convencionais podem ser classificados em três tipos: extrusão, peletização e briquetagem (SILVA *et al.*, 2022).

O briquete é um biocombustível sólido à base de biomassa vegetal moída e compactada em alta pressão e temperatura na faixa de 100° C. (DIAS JÚNIOR, 2013; QUÉNO *et al.*, 2019). De acordo com Tumuluru *et al.*, (2011) A briquetagem é geralmente realizada usando uma prensa de pistão mecânico, prensa de pistão hidráulico ou uma prensa de rolos. A Figura 2 mostra o aspecto físico do briquete.

Figura 2 – Briquete de resíduo madeireiro



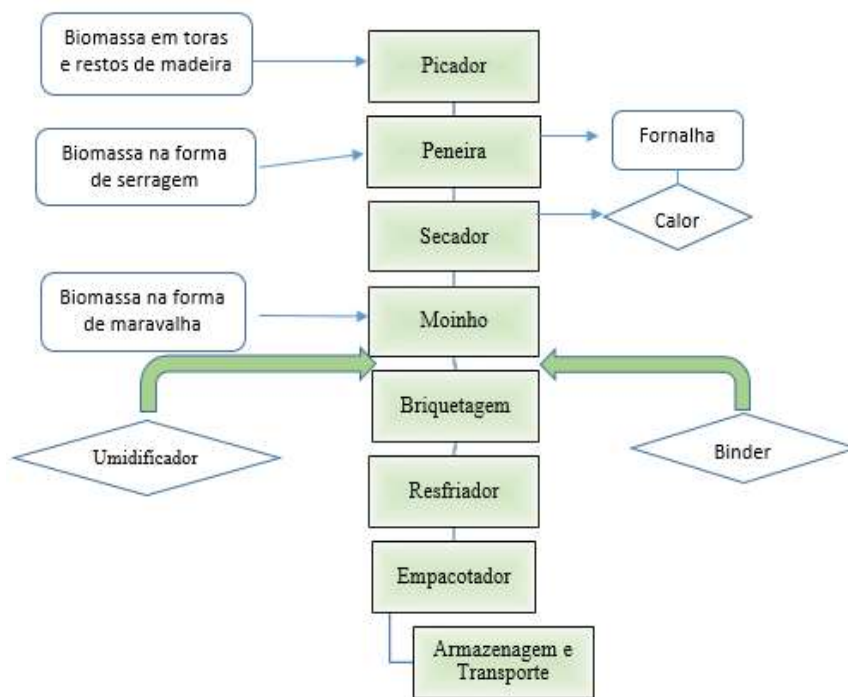
Fonte: O autor

Durante a briquetagem ocorre o aumento da temperatura, a qual provoca a "plastificação" da lignina, substância que atua como elemento aglomerante das partículas de madeira. Para que esta aglomeração tenha sucesso há necessidade de uma umidade de 8 a 15% e granulometria média das partículas de 5 a 10mm. O produto final deste processo, um combustível que apresenta formatos variáveis (cubos, almofadas, cilindros, etc.). O resultado é

um produto alta densidade energética e boa resistência mecânica (DIAS JÚNIOR, 2013; QUÉNO *et al.*, 2019).

O resfriamento é uma das etapas indispensáveis para a produção de briquetes, visto que está intrinsicamente relacionado com a qualidade do produto. É durante o resfriamento que ocorre a condensação do vapor, caso contrário, a pressão do vapor pode provocar fissuras superficiais que fragilizam os briquetes formados (PEREIRA DA SILVA *et al.*, 2021). A Figura 3 ilustra de forma simplificada o processo de briquetagem.

**Figura 3 – Fluxograma simplificado do processo de briquetagem**



Fonte: QUÉNO *et al.* (2019), com adaptações

Alguns produtores utilizam um agente ligante (*binder*) do tipo lignossulfonato. Contudo, esse agente tem efeito negativo no valor calorífico do produto e aumenta a emissão de monóxido de carbono (AHN *et al.*, 2014). Por isso, as normas limitam o uso desses agentes ao máximo de 2% da massa total do produto (TARASOV; SHAHI; LEITCH, 2013). A Tabela 1 apresenta as principais características dos briquetes.

**Tabela 1 – Principais características dos briquetes**

Dimensões	Diâmetro: 70-100 mm
	Comprimento: 250-400 mm
Poder calorífico superior	16,9 – 22,0 MJ/kg (4,04 – 5,26 kcal/kg)
Teor de umidade	8 – 15% (base seca)
Teor de cinzas	Menor que 1,2%
Matéria-prima	Serragem, maravalha e resíduos agrícolas e florestais
Densidade a granel	1.000 – 1.300 kg/m <sup>3</sup>
Conversão termoelétrica	1,0 MWh = 3600MJ $\approx$ 212 kg de briquetes

Fonte: Camargo *et al.* (2017), com adaptações

O processo de compactação da biomassa é recomendado pois aumenta a densidade, diminui o teor de umidade, corrige problemas inerentes aos resíduos antes de serem submetidos ao processo de briquetagem, como a baixa densidade, heterogeneidade entre outros.

## 2.5. Potencial fonte de biomassa para produção de briquetes

No Brasil, os principais resíduos agroenergéticos em potencial para pronto aproveitamento são os gerados no setor sucroalcooleiro e nas indústrias madeireiras. Algumas biomassas não têm grande aplicação imediata devido a custos logísticos de coleta, transformação e pesquisa aplicada (ABIB, 2016).

A principal utilização do bagaço é como insumo para atender à demanda energética (vapor e eletricidade) nas usinas sucroalcooleiras, que utilizam cerca de 90% para esse fim. Mais recentemente, também tem sido observada a utilização do bagaço de cana como matéria-prima na produção de etanol de segunda geração (MORAES *et al.*, 2017).

Além disso, a queima de bagaço em caldeiras das usinas ocorre sem nenhum tratamento prévio, a despeito do seu elevado teor de umidade e elevado volume, e a sua aglomeração, na própria usina, pode elevar a densidade energética do material, aumentando sua eficiência como combustível (MORAES *et al.*, 2017).

Por sua vez, os resíduos industriais de madeira são gerados desde o transporte da madeira em tora à indústria, até seu manuseio e processamento, finalizando no produto acabado. Desse processamento são gerados resíduos de diferentes formatos e características, que podem ser classificados como: cavaco, cepilho, maravalhas e serragem (ABIB, 2016).

Em termos mundiais, os resíduos de madeira figuram entre as principais fontes de biomassa para produção de energia, principalmente quando na forma de briquetes (*wood*



*briquetes*). Durante o desdobro da madeira nas serrarias, o rendimento varia de 37% a 46% (desdobro convencional), já em processos modernos e otimizados pode atingir 63,5%. Em ambos os casos, a produção de resíduos é significativa (MURARA; ROCHA; TRUGILHO, 2013).

## 2.6 Propriedades físicas, químicas e energéticas dos briquetes

Os briquetes são biocombustíveis renováveis, produzidos a partir de resíduos agrícolas e florestais (pó de serra, serragem, maravalha de madeira, bagaço de cana e outros) que passam por processo de secagem (umidade entre 8 e 15%), moagem (tamanho de partículas  $\approx$  5 a 10 mm) e densificação em matriz briquetadeira com abertura de 70 ou 100 mm de diâmetro (DIAS JÚNIOR, 2013; GARCIA *et al.*, 2018).

As características e a qualidade dos briquetes podem ser influenciadas por variáveis relacionadas à matéria-prima (composição da biomassa, teor de umidade, granulometria etc.) e ao processo de produção (SETTE *et al.*, 2018)

Em geral, a biomassa *in natura* apresenta uma umidade considerada alta (>30%) para uso como combustível. Outro agravante é a baixa densidade a granel ( $< 0,25 \text{ g/cm}^3$ ) de alguns tipos de biomassa. Embora a biomassa seja um material abundante, é utilizada de forma não otimizada como combustível sólido. As características como heterogeneidade, baixa densidade, alto teor de cinzas, umidade elevada da biomassa requerem estudos para que o material seja utilizado com maior eficiência (DE CARVALHO *et al.*, 2021).

O teor de umidade é considerado uma das características mais relevantes ao se utilizar biomassa para a geração de energia, tanto em processos termoquímicos, como na combustão e pirólise, quanto em processos físicos, como a densificação para produção de pellets e briquetes pois o valor do poder calorífico é inversamente proporcional à quantidade de água presente no material lignocelulósico (DE MORAES *et al.*, 2019; DIAS JÚNIOR; BRITO; ANDRADE, 2015).

Para qualificar a biomassa em relação a seu potencial energético, é fundamental analisar a composição química dos resíduos. Entre os processos de análise química, a análise imediata visa avaliar a quantidade de materiais voláteis, bem como carbono fixo e teor de cinzas presentes na biomassa para fins energéticos (CAMARGO *et al.*, 2017). De acordo com De Souza *et al.*, (2016), a avaliação realizada através da análise imediata fornece importantes parâmetros na predição da qualidade do briquete, sendo a mais usual neste quesito.

O alto teor de materiais voláteis é importante por ser um facilitador da queima desse material, pois esse parâmetro é o responsável pela ignição do fogo e pela velocidade da combustão. (DE SOUZA *et al.*, 2016).

O carbono fixo é definido como a quantidade de carbono presente na biomassa. Combustíveis com alto índice de carbono fixo apresentam queima mais lenta, implicando maior tempo de residência nos aparelhos de queima, em comparação com outros que tenham menor teor de carbono fixo (DE MORAES *et al.*, 2019) como corroborado em estudos conduzidos por Amorim *et al.*, (2015).

O teor de cinzas é a massa do resíduo sólido inorgânico existente, a biomassa retém todas as cinzas da madeira de origem, principalmente cálcio, potássio e fósforo, além de magnésio, ferro e silício (DE SOUZA *et al.*, 2016). Conforme Nakashima *et al.*, (2017), Valores baixos de teor de cinzas são interessantes do ponto de vista energético, pois altas quantidades de cinzas diminuem o poder calorífico, causando perda de energia e maior custo com manutenção.

A Tabela 2 expressa a umidade e análise química imediata dos briquetes. Trata-se de dados corroborado por Amorim *et al.*, 2015; De Moraes *et al.*, 2019; Dias Júnior; Andrade; Costa Júnior, (2014).

**Tabela 2 – Teor de Umidade e análise química imediata briquetes**

<b>Autores</b>	<b>Teor de umidade (%)</b>	<b>Materiais voláteis (%)</b>	<b>Teor de cinzas (%)</b>	<b>Carbono Fixo (%)</b>
Amorim <i>et al.</i> , 2015 ( <i>Pinus sp</i> )	8,70	87,5	3,20	11,53
De Moraes <i>et al.</i> , 2019 ( <i>Pinus caribaea var. hondurensis</i> )	13,8	87,5	0,21	12,2
Dias Júnior; Andrade; Costa Júnior, (2014) ( <i>Bambu</i> )	15,56	81,00	2,60	16,40

Fonte: Elaboração própria

O poder calorífico é a propriedade mais importante para se avaliar a viabilidade do uso de uma fonte de energia (SOUZA *et al.*, 2021). De acordo com Dias Júnior, (2013) o poder calorífico é o calor total (energia térmica) liberado durante a combustão completa de uma unidade de massa ou de volume de um combustível (kcal/kg ou kj/kg; kcal/m<sup>3</sup>). A determinação do Poder Calorífico Superior (PCS) é feita em recipientes hermeticamente fechados, dentro dos quais os combustíveis são submetidos à queima, sem levar em consideração a energia gasta para evaporar a umidade.

O poder calorífico superior (PCS) é um dos principais parâmetros para expressar a capacidade de geração de energia em substituição aos combustíveis derivados do petróleo. Essa propriedade está relacionada diretamente à quantidade de energia liberada pela madeira em sua combustão (OLIVEIRA *et al.*, 2017).

O poder calorífico inferior é a energia efetivamente disponível por unidade de massa de combustível após deduzir as perdas com a evaporação da água. A determinação deste é feito em bomba calorimétrica, podendo seguir os procedimentos descritos pela norma NBR 8633 (ABNT, 1984). Especificamente para o calorímetro modelo IKA C200 (DIAS JÚNIOR; TAKESHITA, 2017).

O poder calorífico útil (PCU) é a quantidade líquida de calor liberado (PCS), descontada a quantidade de calor para evaporação da água de formação e da água da umidade do combustível. Desta forma, o PCU é a quantidade de calor útil liberado na combustão, utilizado para troca térmica e geração de vapor na caldeira. A maioria dos sistemas de utilização da biomassa para a produção de energia não secam o material abaixo de 10% de umidade, portanto o poder calorífico que melhor se aproxima da realidade é o PCU, derivado do PCI, e que considera um dado teor de umidade (DIAS JÚNIOR; TAKESHITA, 2017; SCHIRMER *et al.*, 2017).

A densidade energética está diretamente relacionada ao poder calorífico da biomassa e à densidade a granel (DA SILVA *et al.*, 2015). Entretanto, os estudos de De Moraes *et al.*, (2019) validam que é desejável que os resíduos lignocelulósicos apresentem maiores valores de densidade a granel, pois fatores como o custo do transporte e a densidade energética são essenciais na viabilidade econômica das energias renováveis (MORAES *et al.*, 2018).

A Tabela 3 expressa o poder calorífico superior, poder calorífico inferior, poder calorífico útil e densidade energética dos briquetes. Trata-se de dados corroborado por (SOUZA *et al.*, 2021; DE MORAES *et al.*, 2019; OLIVEIRA *et al.*, 2017).

**Tabela 3 – Valores energéticos dos briquetes**

<b>Autores</b>	<b>PCS (MJ.Kg-1)</b>	<b>PCI (MJ.Kg-1)</b>	<b>PCU (MJ.Kg-1)</b>	<b>Densidade energética (GJ/m<sup>3</sup>)</b>
Souza <i>et al.</i> , (2021) ( <i>Nim Indiano</i> )	19,72	18,36	14,25	3,34
Oliveira <i>et al.</i> , (2017) ( <i>Pinus sp</i> )	20,8	18,77	15,01	3,40
De Moraes <i>et al.</i> , (2019) ( <i>pinus caribaea var. Hondurensis</i> )	19,10	17,70	14,90	4,07

Elaboração própria

A qualidade da biomassa para geração de bioenergia é conhecida pela quantidade de calor (energia) gerada por unidade de massa. Altos teores de extrativos totais e altos teores de lignina podem influenciar positivamente no poder calorífico dos materiais. De acordo com Nakashima *et al.*, (2017), o teor de extrativos e o teor de lignina além de ajudar no poder calorífico da biomassa, são componentes que ajudam na adesão de partículas, quando em temperaturas elevadas. O poder calorífico superior é um dos parâmetros importantes para diferenciar uma biomassa de outra quanto ao potencial para geração de energia e é dependente da composição química (celulose, hemiceluloses, lignina e extrativos) da biomassa avaliada. A lignina e os extrativos apresentam baixo grau de oxidação e alto calor de combustão em comparação com a celulose e as hemiceluloses, justificando seu uso como biocombustível sólido (PROTÁSIO *et al.*, 2012).

Os briquetes devem ser avaliados quanto: às imperfeições visuais, expansão volumétrica e ganho de umidade. É comum ocorrer a expansão em briquetes, após alguns dias, pela sua interação com o ar do ambiente (MAGALHÃES *et al.*, 2021). De acordo com Ndumbo, (2021), quanto menor é a expansão volumétrica, melhor é a qualidade dos briquetes.

A densidade, expressa a quantidade de material por unidade de volume, portanto, a densidade aparente é determinada pela agregação das partículas. Quanto maior a densidade aparente maior é a resistência final do produto, e facilita a estocagem e transporte dos briquetes. Além disso, a densidade aparente influencia na densidade energética do briquete (MAGALHÃES *et al.*, 2021). De acordo com Paula *et al.*, (2011), para muitos propósitos, a densidade é um é o parâmetro de qualidade mais importante.

A qualidade dos briquetes é avaliada através de algumas características e pelo comportamento durante o uso. A Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD), por exemplo determina a capacidade de empilhamento na estocagem. A Dureza Mecânica define o índice de quebra, e a resistência a abrasão provocada durante o transporte e o manuseio natural dos briquetes (LAVERGNE *et al.*, 2021; PAULA *et al.*, 2011). De acordo com Hu *et al.*, (2015), briquetes com baixa Dureza Mecânica tornam-se quebradiços, em consequência do manuseio, transporte e armazenamento. No entanto, segundo estes autores, estes resultados devem ser interpretados com cuidado porque são influenciados pelo tamanho e pela forma dos briquetes bem como pelas propriedades às quais são produzidos.

A qualidade dos briquetes e seus parâmetros de energia podem ser avaliados por meio de sua cor, que tende a alterar se com o passar do tempo e escurecer, devido à oxidação causada principalmente pela luz, que reage com os componentes químicos da biomassa, como a lignina e a oxidação de determinados extrativos (DE SOUZA *et al.*, 2020; SGARBOSSA *et al.*, 2014).

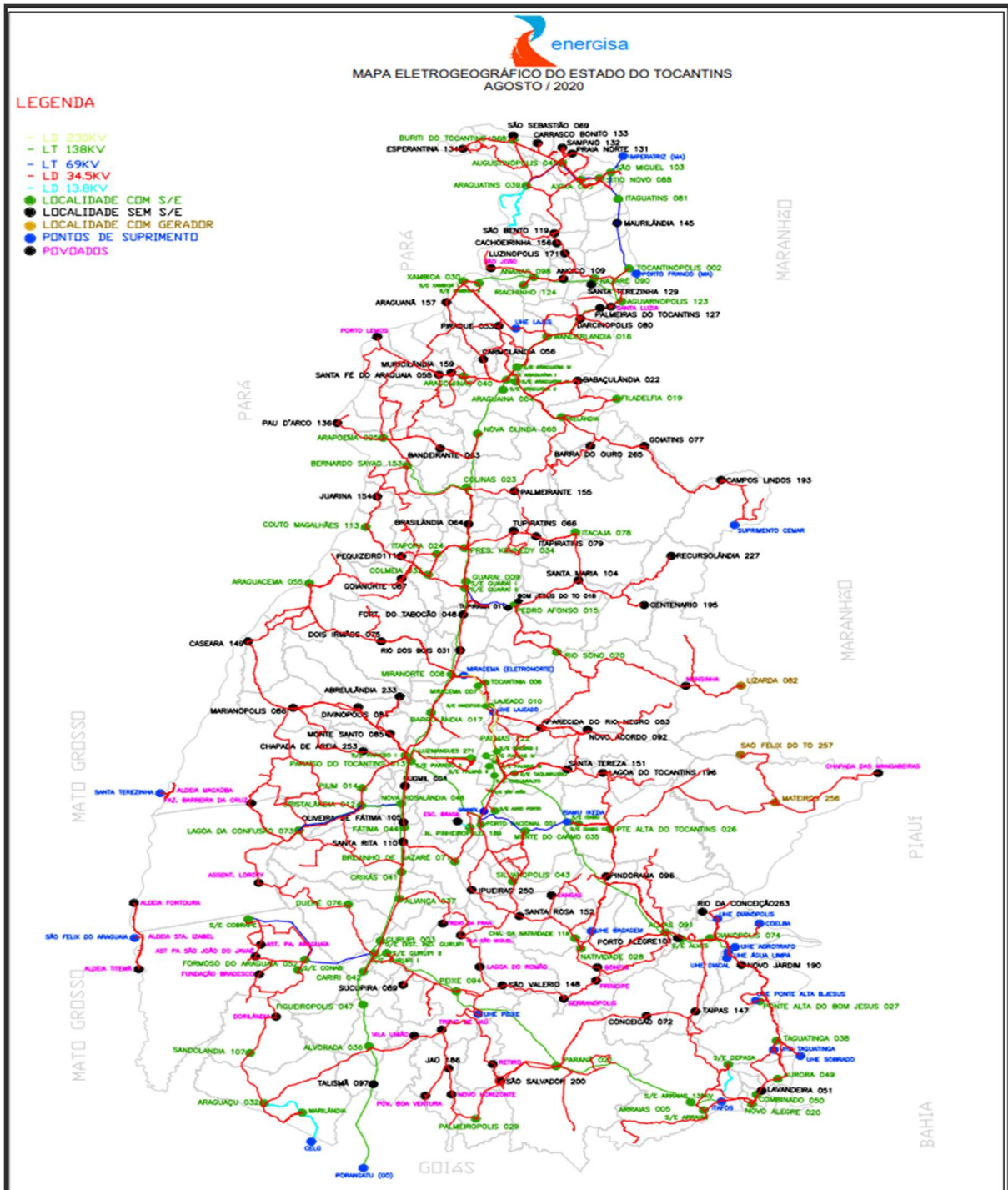
De acordo com De Souza *et al.*, (2020), a colorimetria vem sendo utilizada para avaliar a qualidade da madeira, ela também vem sendo utilizada para conferir a qualidade dos briquetes e seus parâmetros de energia. Portanto esse critério pode ser usado como suporte visual de qualidade para o consumidor final.

A densidade energética é um parâmetro que está diretamente relacionado com o poder calorífico e a densidade da biomassa. E, portanto, indispensável quando se quer comparar diferentes biomassas. A densidade energética define a qualidade do produto a partir das características químicas, as condições de umidade e a quantidade de calor do produto final em uma única variável.

### 3- MATERIAL E MÉTODOS

O Estado do Tocantins é atendido atualmente por 100 mil km de rede elétrica, distribuída entre redes de Baixa Tensão (BT), Média Tensão (MT) e Alta Tensão (AT) sob responsabilidade do Grupo Energisa conforme mapa eletrogeográfico ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Mapa eletrogeográfico do Estado do Tocantins



Fonte: Energisa Tocantins (2022)

Os níveis de tensão elétrica nominal, padronizados pela Energisa, no estado do Tocantins são 230, 138 e 69 KV em Alta Tensão, 34,5 e 13,8 KV em Média Tensão e 440, 380 e 220 V em Baixa Tensão. As Redes de Distribuição são do tipo aérea convencional, compacta e multiplex. A rede de energia pode sofrer influência da arborização, as quais demandam manutenção e conseqüentemente gera uma quantidade expressiva de resíduos.

Para desenvolvimento deste trabalho foi tomado para estudo a área urbana dos vinte maiores municípios do estado, os quais são contemplados com o contrato de manutenção preventiva de podas de árvore pela Empresa Redeforte, com equipamentos de trituração, coleta e transporte dos resíduos arbóreos.

As podas da arborização são planejadas de acordo com os indicadores de qualidade de cada alimentador, logística e orçamento. A partir do momento em que os alimentadores são priorizados, as cidades também são priorizadas com a criação de lotes que irão conter todas as estruturas das cidades, onde as equipes de podas irão percorrer e mapear as podas executadas e as pendências para as equipes de linha viva.

### **3.1 Estimativa do Resíduo de Poda Urbana**

O método utilizado para o levantamento quantitativo do volume estéreo de biomassa gerado nos últimos 12 meses no Estado do Tocantins nos 20 maiores municípios pela Empresa Energisa Tocantins foi:

- ✓ Medição do volume do caminhão no qual transporta a biomassa triturada: comprimento da carroceria multiplicado pela largura e altura;
- ✓ Análise da umidade da biomassa triturada em forno mufla;
- ✓ Quantificação das equipes de manutenção da empresa REDEFORT que atuam nos vinte maiores municípios do Estado;
- ✓ Apontamento da quantidade de viagens por equipe e a produtividade por mês.

Este levantamento foi realizado por meio de formulário eletrônico e todas as informações compiladas e analisadas para determinar:

- ✓ Volume médio de biomassa descartada;
- ✓ Importância de cada alimentador;
- ✓ Frequência da manutenção.

### 3.2 Estimativa das espécies de árvores em conflito com a rede elétrica

Para mapear as espécies mais frequentes na manutenção das podas de árvore da ETO, tomou-se como base a metodologia descrita no artigo Torres *et al.*, (2021). Em seguida, foi elaborado um levantamento no qual as equipes de podas da empresa REDEFORT enumeraram as espécies podadas no período entre 5 de maio a 5 de junho de 2022 através de uma planilha.

Um estudo quantitativo foi apresentado sobre as espécies mais conflitantes com a rede elétrica. O método foi elaborado quantitativamente e processado em planilha eletrônica utilizando o programa Excel.

### 3.3 Coleta e preparo da biomassa para análises laboratoriais

Com a finalidade de preparar as amostras para análise laboratorial, a biomassa residual oriunda da poda de árvore foi coletada junto a manutenção das Redes de energia nas Quadras 507 Sul, 210 Sul, e 204 Sul no município de Palmas Tocantins no período entre 01 de junho a 7 de junho de 2022. As espécies selecionadas foram *Licania tomentosa Benth. Fritsch* - Oiti Sem Folhas (OSF), *Azadirachta indica*. - Neem Sem Folhas (NSF), *Mangifera indica L* - Manga Sem Folhas (MSF), *Licania tomentosa Benth. Fritsch* - Oiti Com Folhas (OCF), *Azadirachta indica* - Neem Com Folhas (NCF) e *Mangifera indica L* - Manga Com Folhas (MCF).

A biomassa coletada passou por processo de secagem ao ar livre por um período de 21 dias. O resíduo foi acomodado em local seco, exposto ao sol, revolvido três vezes ao dia e coberto durante a noite para não ser exposto a umidade.

Após o processo de secagem ao ar livre, a biomassa foi submetida ao processo de moagem para adequação das partículas em um moinho de martelo modelo DPM-2 com ciclone, motor trifásico 5CV 3500 RPM e 20 martelos, da marca NOGUEIRA, com uma peneira de corte de 5,0 mm.

A biomassa processada foi embalada em sacos plásticos para evitar fungos. O total de biomassa após o processamento totalizou 38 kg. As embalagens foram etiquetadas de acordo com o conteúdo e reforçadas para serem enviadas ao Laboratório de Energia da Biomassa da Universidade Federal do Espírito Santo (LEB/UFES).

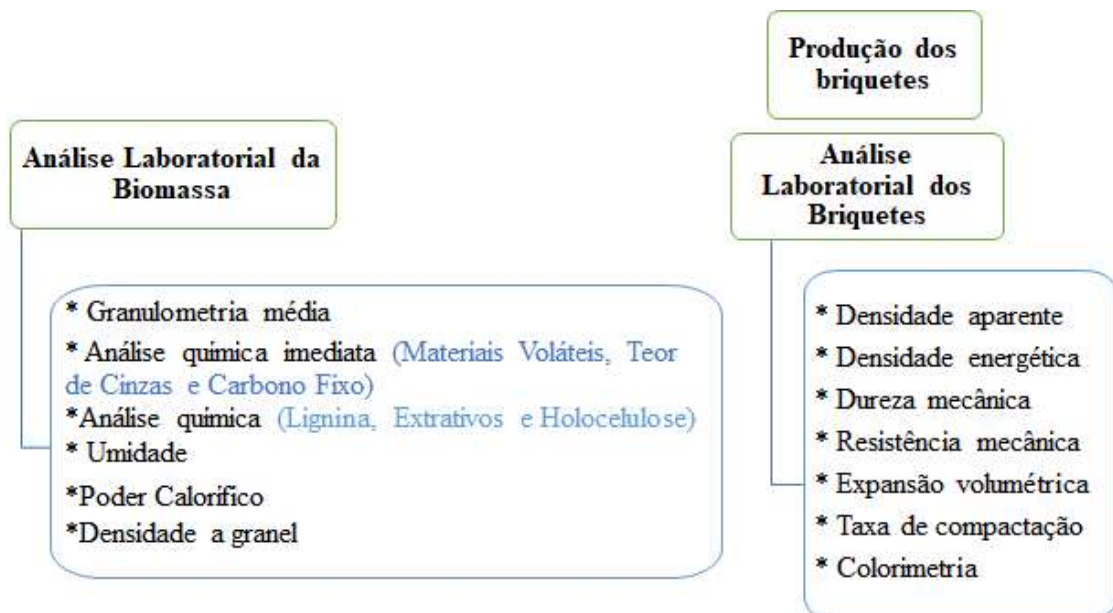
### 3.4 Planejamento estatístico da pesquisa



O planejamento estatístico da pesquisa, a briquetagem da biomassa e as análises laboratoriais foram executados junto ao Laboratório de Energia da Biomassa da Universidade Federal do Espírito Santo LEB/UFES, do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, na cidade de Jerônimo Monteiro – ES.

Para otimização do tempo e dos recursos empregados na pesquisa laboratorial, fez-se necessário uma roteirização, a qual divide as análises laboratoriais em três etapas: produção dos briquetes, análise laboratorial da biomassa a granel e análise laboratorial dos briquetes, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Roteirização das análises laboratoriais



Fonte: O autor

O *software R Studio* versão 4.0.2 foi utilizado para a análise estatística dos dados. O experimento foi conduzido sob delineamento inteiramente casualizado. Foram utilizados seis tratamentos e 4 repetições para cada variável estudada. Para permitir a análise de variância (ANOVA), os dados foram submetidos aos testes de normalidade (Shapiro-Wilk) e homogeneização das variâncias (homocedasticidade). Atendidos os pressupostos, e quando o teste F foi significativo ( $p < 0,05$ ), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). A correlação de Pearson (teste t;  $p < 0,05$ ) foi realizada nos parâmetros relacionadas aos resíduos e aos briquetes.

### 3.5 Análise Laboratorial da Biomassa

### 3.5.1 Granulometria média

Para a determinação da granulometria média empregou-se os métodos preconizados pela Norma ABNT NBR 7402 (1982) adaptados para biomassa moída vegetal. Utilizou-se peneiras granulométricas redondas da marca BERTEL com agitação manual. Foram utilizadas 100 g da biomassa e tempo de agitação de cinco minutos. A classificação granulométrica do material foi determinada utilizando-se as peneiras com abertura de 18 mesh (1 mm), 20 mesh (0,841 mm), 40 mesh (0,420 mm), 60 mesh (0,250 mm), e fundo.

### 3.5.2 Densidade a granel

A determinação da densidade a granel foi definida de acordo com a Norma ASTM 5057-17 (ASTM, 2017) com o auxílio de um recipiente cúbico de volume conhecido (1.288,2 cm<sup>3</sup>), o qual foi preenchido até a borda com biomassa a granel, e com o auxílio de uma balança de precisão de 0,1 g da marca BEL ENGINEERING, obteve-se a massa, com variação admitida entre as repetições de 2% em cada tratamento. Nesse caso, a densidade também foi obtida através da razão entre a massa e o volume, sendo utilizada a Equação 7:

$$DG = \frac{M}{V} * 1.000 \quad (7)$$

*Em que:*

*DA = Densidade à Granel (g/cm<sup>3</sup>);*

*M = massa do material (g);*

*V = Volume do recipiente (cm<sup>3</sup>).*

### 3.5.3 Análise química imediata: Materiais Voláteis (MV), Teor de Cinzas (CZ) e Carbono Fixo (CF)

Para Análise química imediata Materiais Voláteis (MV), Teor de Cinzas (CZ) e Carbono Fixo (CF) empregou-se os métodos propostos pela Norma D1762-84 (ASTM, 2021b) adaptados para biomassa vegetal moída.

Para determinação do teor de Materiais Voláteis (MV), a biomassa utilizada foi moída e passada na peneira 40 e retida na peneira 60 *mesh*. Pesou-se uma grama de biomassa em uma

balança analítica com precisão de 0,0001g da marca BEL ENGINEERING. Levou-se o material em cadinho com tampa, para mufla estabilizada na temperatura de 900° C por 7 minutos. Após a retirada, o material foi colocado em dessecador para esfriar por 30 minutos. Após o preparo, obteve-se o peso de material seco sem a presença dos materiais voláteis empregando o cálculo da Equação 2.

$$MV (\%) = \left[ \frac{(Mf - Mms)}{(Mf)} \right] * 100 \quad (2)$$

*Em que:*

*MV = Materiais Voláteis (%);*

*Mf = Massa inicial seca (g);*

*Mms = massa da matéria seca após 900° C (g).*

Para determinação do Teor de Cinzas (CZ), foram utilizados os mesmos cadinhos das análises de Materiais Voláteis (MV), desta vez sem os voláteis e sem tampas. Os cadinhos foram levados à mufla estabilizada em 600° C por um período de 4 horas. Após esse período, o material foi colocado em dessecador para esfriar por 30 minutos e em seguida pesado. Aqui, obteve-se a massa do resíduo após completa incineração do material. Após o preparo, obteve-se Teor de Cinzas (CZ) empregando o cálculo da Equação 3.

$$TC (\%) = \left[ \frac{(Mr)}{(Mf)} \right] * 100 \quad (3)$$

*Em que:*

*CZ = Teor de Cinzas (%);*

*Mf = Massa inicial seca (g);*

*Mr = massa da matéria seca após incineração a 600° C (g).*

Para determinação do Carbono Fixo (CF), é calculada a diferença, subtraindo da massa, os Materiais Voláteis (MV) e o Teor de Cinzas (CZ) empregando o cálculo da Equação 4.

$$CF = 100 - (MV + CZ) \quad (4)$$

*Em que:*

*MV = Materiais Voláteis (%);*

*CZ = Teor de Cinzas (%).*

### 3.5.4 Análise química estrutural (Lignina, Extrativos e Holocelulose)

Foi realizada análise química estrutural (lignina, extrativos e holocelulose). As amostras de resíduos lignocelulósicos foram moídas no armazém da UFES e classificadas em peneiras sobrepostas de 40 *mesh* (0,420 mm), 60 *mesh* (0,250 mm) e fundo. A fração retida entre as peneiras de 40 e 60 *mesh* foram utilizadas para a análise química estrutural. As biomassas foram secas em estufa de circulação forçada de ar ( $103 \pm 2$  °C) antes dos testes.

Os extrativos totais (1:2 álcool-tolueno, álcool etílico e água quente) foram obtidos pela soma dos extrativos solúveis em acetona e solúveis em água, conforme preconiza as Normas Extrativos: *Sampling and testing wood pulp shipments for moisture, Test Method T 210 cm-13* e Lignina: *Technical Association of the Pulp and Paper Industry – TAPPI. T 222om-97: Acid Insoluble Lignin in Wood and Pulp, 1997.*

O material acondicionado nos cartuchos confeccionados a partir de papel filtro irá para vidrarias específicas com água destilada, e posteriormente submete-se a solução ao “banho maria” por intervalo pré-determinado.

A determinação do teor de extrativos ocorreu por meio do processo de análise química da madeira, onde utiliza-se quantidades pequenas de amostras que requereram testes atenciosos e cuidadosos na manipulação de vidrarias e solventes. A Figura 6 ilustra o processo da análise química estrutural no LEB/UFES.

**Figura 6 – Processo de análise química estrutural LEB/UFES**



Fonte: O autor

O processo de filtração necessitou de cadinhos filtrantes e bomba de vácuo. Posteriormente, outras técnicas de filtração e extração ocorreram para a retirada de todos os extrativos solúveis em água quente, como por exemplo alguns sais, açúcares e polissacarídeos.

### 3.5.5 Umidade

Para a determinação da umidade, empregou-se os métodos preconizados pela Norma D1762-84 (ASTM, 2021b) adaptados para biomassa moída vegetal. A biomassa utilizada na análise de umidade foi moída e passada na peneira 40 e retida na peneira 60 *mesh*. Pesou-se duas gramas de biomassa em uma balança analítica com precisão de 0,0001g da marca BEL ENGINEERING. Levou-se o material em cadinho, para estufa regulada em  $105 \pm 3^\circ \text{C}$  por duas horas. Após a retirada da estufa, o material foi colocado em dessecador para esfriar por 15 minutos e em seguida pesado. Após o preparo, o peso da massa úmida ( $M_i$ ) e o peso final da massa seca ( $M_f$ ), foram aplicados na Equação 1.

$$U (\%) = \left[ \frac{(M_i - M_f)}{(M_f)} \right] * 100 \quad (1)$$

*Em que:*

$U$  = Umidade base seca (%);

$M_i$  = Massa inicial úmida (g);

$M_f$  = Massa final seca (g).

### 3.5.6 Poder calorífico

O poder calorífico superior (PCS) dos tratamentos foi mensurado a partir de amostras moídas e classificadas em peneiras de 60 *mesh*, as quais foram colocadas em estufa a  $105 \pm 5^\circ \text{C}$  por 24 horas (até atingirem peso constante) para retirada total da umidade, sendo utilizada uma porção de 1g da amostra completamente seca, em uma bomba calorimétrica adiabática, modelo IKA C200 (Figura 7), conforme preconizado pela norma DIN 51900 (DIN, 2000).

**Figura 7 – Bomba calorimétrica IKA C200**

Fonte: O autor

Um cadinho com amostra foi colocado suspenso em um recipiente com um fio de algodão, que por sua vez, está posicionado sobre uma resistência elétrica que irá fornecer o calor necessário para que ocorra a centelha e ignição da amostra, conforme pode ser visto na Figura 8a. O recipiente é lacrado e pressurizado com oxigênio a 30 bar, exemplificado na Figura 8b. Então ele é posicionado no interior da bomba calorimétrica. O reservatório desta é preenchido com água à 18°C, oriunda de um banho térmico, e então realiza-se o experimento para determinar o poder calorífico superior (PCS) de cada amostra.

**Figura 8 – a) cadinho inserido na estrutura em contato com o filamento e b) Recipiente contendo a amostra preparado para ser inserido na bomba calorimétrica**

a)



b)

Fonte: O autor

O poder calorífico útil foi obtido a partir dos valores do poder calorífico inferior (PCI), empregando a Equação 5:

$$PCI = PCS - (600 \times 0,09 \times \%H) \quad (5)$$

*Em que:*

*PCI= Poder Calorífico Inferior (MJ/Kg);*

*PCS= Poder Calorífico Superior (MJ/Kg);*

*%H= Teor de Hidrogênio (considerado 6 % para este trabalho).*

Já o poder calorífico útil (PCU) será obtido com o auxílio da Equação 6.

$$PCU = PCI(1 - U) - 600U \quad (6)$$

*Em que:*

*PCU = poder calorífico útil (MJ/Kg);*

*PCI = poder calorífico inferior (MJ/Kg), obtido pela subtração PCS – 304 (energia de formação de vapor d'água);*

*U = umidade (%), base seca.*

### **3.6 Produção dos briquetes**

Os briquetes foram preparados empregando-se massa de 20 g, pressão de 90 Bar, tempo de prensagem de 5 minutos e tempo de resfriamento de 5 minutos. A umidade média encontrada na biomassa moída foi de 8% e granulometria média inferior a 4 mm. Após a briquetagem, cada briquete pesou aproximada de 20 g e apresentou um volume aproximado de 16,00 cm<sup>3</sup>. Para produção de briquetes, foram preparados dez briquetes para cada um dos doze tratamentos, totalizando 120 briquetes produzidos. A temperatura ajustada no termostato da Briquetadeira BL-32 foi de 90°C e 110°C sob uma pressão de 90 Bar. Os tratamentos foram: Neem Sem Folhas (NSF), Oiti Sem Folhas (OSF), Manga Sem Folhas (MSF), Neem Com Folhas (NCF), Oiti Com Folhas (OCF) e Manga Com Folhas (MCF). As variáveis foram as temperaturas de briquetagem em 90°C e 110°C. Um total de 60 briquetes foram produzidos para a variável de 90°C e 60 briquetes foram produzidos para a variável de 110°C. Os Tratamentos sem folhas,

consistiram em 100% de caule moído, os Tratamentos com folhas consistiram em 50% de caule moído e 50% de folhas moídas.

A briquetadeira utilizada para produção dos briquetes foi uma BRIQUETADEIRA LABORATORIAL BL-32 LIPPEL acoplada a um motor trifásico WEG de 3 CV, conforme a Figura 9.

**Figura 9 – Briquetadeira BL-32 LIPPEL**



Fonte: O autor

Não foi utilizado nenhum tipo de aglutinante para produção dos briquetes. O calor previamente ajustado na matriz briquetadeira, provocou a transformação dos componentes lignocelulósicos contidos na biomassa em um potente aglutinante natural. O resultado foi um produto adensado de alta densidade energética e boa resistência mecânica.

Após o processo de produção, os briquetes foram levados a uma sala climatizada em temperatura de 20° C com objetivo de estabilizar a expansão volumétrica em ambiente com temperatura e umidade controladas.



### 3.7 Análise Laboratorial dos Briquetes

#### 3.7.1 Densidade aparente dos briquetes

A determinação da densidade aparente do briquete foi definida de acordo com a Norma ASTM 5057-17 (ASTM, 2017). Com o auxílio de um paquímetro digital STAINLESS HARDENED 6 IN/150 MM foram feitas as medições de diâmetro e altura para cada briquete, para calcular o volume dos mesmos e em seguida aferido a massa com o auxílio de uma balança analítica com precisão de 0,0001g da marca BEL ENGINEERING. Nesse caso, a densidade também foi obtida através da razão entre a massa e o volume, sendo utilizada a Equação 8:

$$DA = \frac{(M)}{(V)} * 1.000 \quad (8)$$

*Em que:*

*DA = Densidade Aparente do briquete (g/cm<sup>3</sup>);*

*M = massa do briquete (g);*

*V = Volume do briquete (cm<sup>3</sup>).*

#### 3.7.2 Expansão Volumétrica dos Briquetes

Com auxílio de um paquímetro digital, mediu-se as dimensões e averiguou-se a expansão volumétrica dos briquetes ao longo de 12 dias, sendo as medições realizadas após a produção de cada briquete e em: 2, 4, 6, 8, 10 e 12 dias após briquetagem, para observar a estabilidade dimensional do material. O acondicionamento dos briquetes se efetuou, na bancada do laboratório com temperatura entre 20 ° C e umidade relativa 35%. Para o cálculo da expansão volumétrica final dos briquetes, utilizou-se a Equação 9:

$$EV (\%) = \frac{(Vf - Vi)}{(Vi)} * 100 \quad (9)$$

*Em que:*

*EV = Expansão Volumétrica (%);*

*Vi = volume inicial dos briquetes logo após briquetagem (mm<sup>3</sup>);*

*Vf = volume final dos briquetes 12 dias após briquetagem (mm<sup>3</sup>).*

### 3.7.3 Dureza mecânica

Para análise de dureza mecânica foi utilizado um durômetro SHORE D METRO TOKYO com medição realizada por penetração de agulha de aço com força de medição de 0 a 44,5 N e Capacidade de 0 a 100 Shore D (HD). Para cada briquete foram realizadas quatro medições, duas nas superfícies superior e inferior e duas nas laterais do briquete. A Figura 10a mostra o teste de dureza mecânica na superfície do briquete e a figura 10b mostra o teste de dureza mecânica na lateral do briquete.

Figura 10 – a) Teste de dureza na superfície do briquete e b) teste de dureza na lateral do briquete



a)



b)

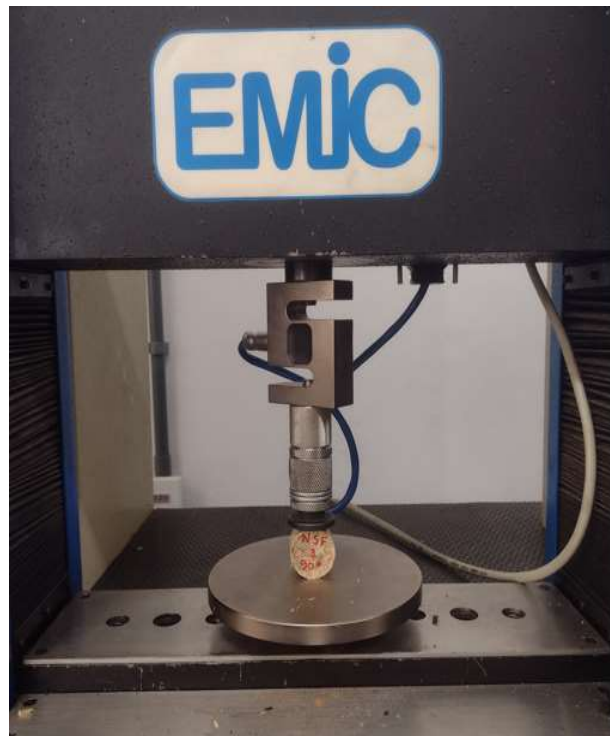
Fonte: O autor

Inicialmente realizou-se a calibração da caneta leitora de dureza. Em seguida, com as amostras individualmente identificadas, iniciaram-se os ensaios, que consistiu em engatilhar a caneta conectada ao Durômetro Portátil, posicioná-la perpendicularmente ao briquete, logo após disparar o dispositivo do equipamento e realizar a leitura.

### 3.7.4 Resistência à Tração por Compressão Diametral

O ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral (RTCD) foi baseado em um método brasileiro chamado “*Diametrical Compression Test*”. Esses ensaios foram realizados para determinar a resistência à compressão dos briquetes. O briquete é posicionado entre dois discos que atuam de forma a comprimi-lo com uma velocidade de 3 mm/min até que a primeira trinca ocorra. A força responsável pelo surgimento da trinca na amostra pode ser determinada de acordo com a Figura 11. Por fim, o briquete sofre fratura diametralmente. O equipamento utilizado foi uma máquina universal de ensaios EMIC DL10000 com capacidade máxima para 100 kN.

**Figura 11 – Máquina universal de ensaios**



Fonte: O autor

Realizou-se o ensaio de compressão no sentido diametral (perpendicular ao sentido da compactação da biomassa).

### **3.7.5 Taxa de compactação**

A taxa de compactação requerida pelos briquetes foi calculada dividindo a densidade aparente do briquete pelo valor da densidade do respectivo resíduo conforme Equação 10.

$$TC = \frac{DA}{DG} \quad (10)$$

*Em que:*

*TC = Taxa de Compactação;*

*DA = Densidade Aparente do Briquete;*

*DG = Densidade a Granel da Biomassa.*

A análise de taxa de compactação foi aplicada com quatro repetições por tratamento.

### 3.7.6 Colorimetria

A análise de Colorimetria foi realizada por meio de um espectrofotômetro CM-2600D Konica Minolta conforme Figura 12.

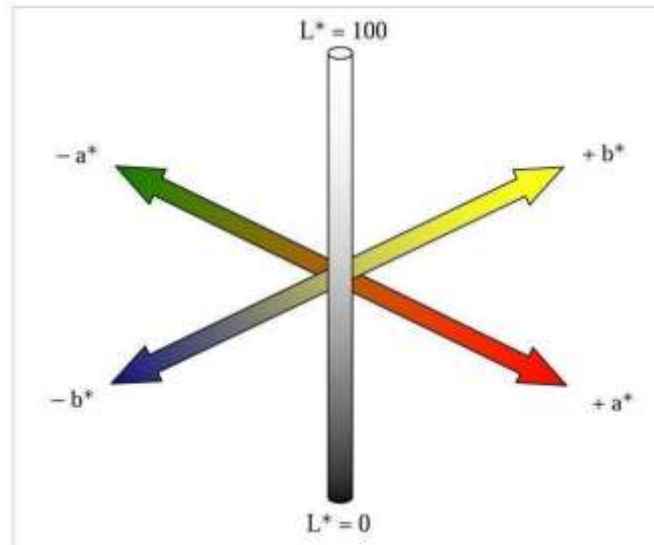
**Figura 12 – Espectrofotômetro CM-2600D KONICA MINOLTA**



Fonte: O autor

A verificação colorimétrica foi feita pela mensuração da claridade (L), a coordenada vermelho-verde (a) e a coordenada azul-amarelo (b), também denominado como sistema de cor CIELab, definido pela Comissão Internacional sobre Iluminação (CIE) conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 13 – Esquema tridimensional de cor CIELab



Fonte: (MAGALHÃES *et al.*, 2019)

A análise de Colorimetria foi realizada com quatro repetições por tratamento. Portanto, para cada repetição, foram realizadas três medições.

### 3.7.7 Densidade energética

A densidade energética do briquete foi calculada por meio do produto do poder calorífico útil (PCU) e da densidade aparente (DA), conforme a Equação 11:

$$DE (Mcal/m^3) = \frac{PCU \times DA}{1000} \quad (11)$$

*Em que:*

*DE = densidade energética expressa (MJ/m<sup>3</sup>);*

*PCU = Poder Calorífico Útil expresso (MJ/m<sup>3</sup>);*

*DA = densidade Aparente expressa (kg/m<sup>3</sup>).*

### 3.7.8 Ganho de umidade

O incremento no ganho de umidade foi analisado com auxílio de uma balança analítica com precisão de 0,0001g da marca BEL ENGINEERING. Foram aferidas as respectivas massas dos briquetes ao longo de 12 dias, sendo as medições realizadas após a produção de cada briquete em 2, 4, 6, 8, 10 e 12 dias após briquetagem, para observar o ganho de massa. O

acondicionamento dos briquetes se efetuou, na bancada do laboratório com temperatura de 20°C e umidade relativa do ar de 35%.

A análise de ganho de umidade foi avaliada com quatro repetições por tratamento.

### 3.8 Análise preliminar de uma usina de briquetes

Para análise do aproveitamento do Resíduo de Biomassa descartado, foi elaborado uma pesquisa bibliográfica junto a artigos científicos. Nesse intuito, foi utilizado para pesquisas: livros, artigos, dissertações e outros.

Para análise preliminar de um Centro de Processamento de Biomassa (briquetes), elaborou-se um estudo simplificado de viabilidade técnico-econômica baseado na metodologia de Rodrigues *et al.* (2015), intitulada “*Análise do potencial de reutilização dos resíduos provenientes de poda, município de Palmas, Tocantins*” publicado na Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, inicialmente foi escolhido o Material, o processo e os equipamentos a serem utilizados no tratamento dos resíduos. Em seguida, foram calculados os investimentos iniciais, a estrutura de custos operacionais fixos e variáveis e os índices técnico-econômicos da Usina de briquetes.

Foram calculados os investimentos iniciais, a estrutura de custos operacionais fixos e variáveis e os índices técnico-econômicos da Usina. O ponto de equilíbrio operacional pode ser descrito pela equação 12 (RODRIGUES *et al.*, 2015):

$$PE = \frac{CF}{(LO+CF)} = \frac{CF}{(RB+CB)} \quad (12)$$

*Em que:*

*PE = Ponto de Equilíbrio;*

*CF = Custos fixos;*

*LO = Lucro Operacional;*

*RB = Receita Bruta.*

Com isto será possível calcular o Lucro Operacional (LO) e o Grau de Alavancagem Operacional (GAO) pelas equações 13 e 14 abaixo:

$$LO = RB - CF - CB \quad (13)$$

$$GAO = 1 + \frac{CF}{(LO)} \quad (14)$$

*Em que:*

*CV = Custos variáveis;*

*LO = Lucro Operacional.*

Segundo Rodrigues *et al.* (2015) a Receita Bruta refere-se à receita das vendas e serviços; Lucro Operacional é o valor da Receita de vendas líquida menos todas as despesas; Ponto de Equilíbrio refere-se ao volume de vendas necessário para cobrir todos os custos fixos e variáveis da empresa e; o Grau de Alavancagem Operacional refere-se ao grau de capacidade que tem uma empresa de aplicar os recursos do seu lucro operacional.

### **3.9 Análise de dados**

Foi utilizado a matriz de correlação de Pearson, para identificar as variáveis envolvidas no estudo que se relacionam entre si. A determinação do grau de relação entre duas variáveis é dada para os pares de variáveis. Esse coeficiente é um número entre -1 e 1 que expressa o grau de dependência linear entre duas variáveis quantitativas, que quando negativa indica que uma variável diminui com o aumento da outra, e positiva quando uma variável aumenta com o aumento da outra.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Estimativa de biomassa produzida no ano de 2021

O contrato de manutenção das Redes de Distribuição contempla três equipes de podas de árvores, cada uma contendo um caminhão basculante com capacidade para 14 m<sup>3</sup> com triturador, uma camionete 4x4 cabine dupla com grade adequada para transporte da equipe e das ferramentas. Cada equipe é composta por 1 eletricista encarregado, 1 eletricista podador, 3 auxiliares de serviços gerais podadores, 2 operadores de motosserra e um motorista. A Figura 14 ilustra uma poda, trituração e coleta na Quadra 204 Sul em Palmas Tocantins.

Figura 14 – Poda, trituração e coleta de na Quadra 204 Sul em Palmas



Fonte: O autor

A Concessionária de Energia Elétrica Energisa Tocantins realizou no ano de 2021, 90.000 podas de árvores em todo estado, como parte de uma meta estipulada pela Coordenação de Manutenção e Projetos da empresa. Estimou-se que o quantitativo dos Resíduos de Poda de Urbana realizado junto à Rede elétrica, nesse período seja de 14.000 m<sup>3</sup>, o equivalente a 9.400 t/ano. Considerando custo anual dos serviços de coleta e transporte de R\$ 2.500.000,00, estima-se um valor de aproximadamente R\$ 265,96 por cada tonelada coletada desse resíduo. A Tabela 4 expressa o quantitativo de biomassa gerada pela Energisa Tocantins, nos vinte maiores municípios do Estado, proveniente das podas de árvore, no período de janeiro a dezembro de 2021.



**Tabela4 – Estimativa de biomassa gerada na Energisa Tocantins no período de 2021**

<b>Localidade</b>	<b>Quantitativo anual (m³)</b>	<b>Percentual estimado de Umidade (%)</b>	<b>Quantitativo anual estimada (Toneladas)</b>
<b>Regional Centro</b>			
(Palmas, Paraíso, Porto Nacional, Miracema, Lagoa da Confusão e Miranorte)	6.720,00	30	4.700,00
<b>Regional Norte</b>			
(Araguaína, Araguatins, Colinas, Guaraí, Tocantinópolis, Augustinópolis, Pedro Afonso, Goiatins, Nova Olinda e São Miguel)	4.032,00	30	2.350,00
<b>Regional Sul</b>			
(Gurupi, Dianópolis, Formoso e Taguatinga)	4.032,00	30	2.350,00
<b>Quantidade total de biomassa estimada em 2021 (toneladas)</b>			<b>9.400,00</b>

Fonte: Elaboração própria

Levou-se em consideração, uma média de vinte dias úteis trabalhados em casa mês, sendo descontados os sábados, domingos e feriados. Considerou-se também, o teor de umidade da biomassa no momento da poda, onde a quantidade de água presente nos resíduos foi estimada em 30% conforme análise laboratorial realizada no Laboratório de Materiais Compósitos da Universidade Federal do Tocantins.

#### **4.2 Estimativa das espécies de árvores mais frequentes na arborização urbana**

Para estimar as espécies mais frequentes em conflito com a Rede de Distribuição no Estado do Tocantins, tomou-se como base, a Cidade de Palmas e refletiu-se para todo estado. Nas ruas das quadras residenciais de Palmas–TO foram contabilizados 4.763 indivíduos de 145 espécies arbóreas. Aproximadamente 40% das árvores existentes na zona urbana de Palmas estão em conflito com a rede elétrica (TORRES *et al.*, 2021).

A Tabela 5 lista as seis espécies mais frequentes em conflito com a rede elétrica e os respectivos portes (M para porte médio e G para porte grande) de acordo com o levantamento de campo e confrontado com os estudos de Torres *et al.*, 2021

Tabela 5 – Estimativa de biomassa gerada na Energisa Tocantins no período de 2021

Espécie	Nome popular	Percentual de árvores sob a Rede elétrica	Porte
<i>Licania tomentosa</i> (Benth.) Fritsch	Oiti	16,7	M
<i>Mangifera indica</i> L	Manga	5,1	G
<i>Azadirachta indica</i>	Neem	4,3	M
<i>Anacardium occidentale</i> L.	Caju	3,8	M
<i>Handroanthus impetiginosus</i>	Ipê-roxo	3,5	M
<i>Syzygium cumini</i> L.	Jamelão	3,3	M

Fonte: Elaboração própria

Dentre as três espécies mais frequentes situadas sob a rede elétrica estão a *Licania tomentosa* Benth. Fritsch (Oiti) com 16,7% dos indivíduos, a *Mangifera indica* L. (Manga) com 5,1% e *Azadirachta indica* (Neem-indiano) com aproximadamente 4,3 dos indivíduos. Juntas estas três espécies representaram 26,1% do total de árvores em conflito com a rede elétrica (PINHEIRO; MARCELINO; MOURA, 2020). As Figuras 15, 16 e 17 ilustram as podas de três das espécies mais frequentes sob a rede elétrica.

Figura 15 – Poda de um Oiti na Quadra 210 Sul em Palmas



Fonte: O autor

**Figura 16 – Poda de uma mangueira na Quadra 204 Sul em Palmas**



Fonte: O autor

**Figura 17 – Poda de um Neem na Quadra 204 Sul em Palmas**



Fonte: O autor

Após a poda, trituração e recolhimento, o resíduo de poda de árvore é depositado no pátio das Prefeituras de cada regional. No caso de Palmas, há um local de destinação, situado na Quadra 412 Sul, Avenida NS-10 próximo ao Centro de Convenções Arnaud Rodrigues.

### 4.3 Caracterização da Biomassa

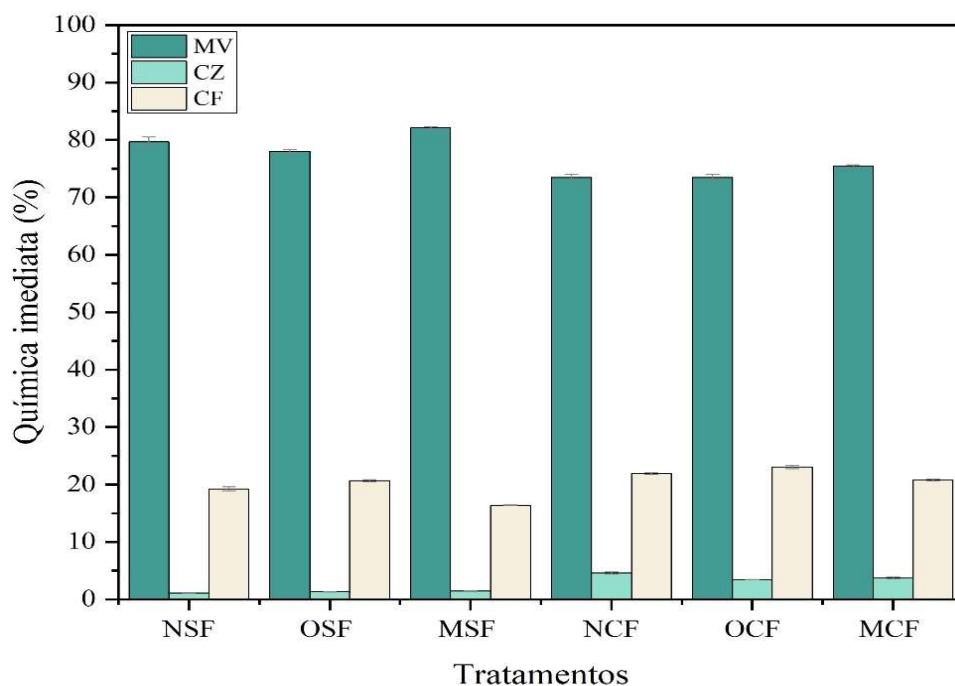
#### 4.3.1 Classificação granulométrica

A caracterização da biomassa selecionada, obtida a partir dos Resíduos de Poda Urbano (RPU) da Energisa Tocantins iniciou-se pela sua classificação granulométrica, tendo sido observadas partículas com diferentes tamanhos. Todo o material utilizado foi considerado na nomenclatura como “fino”. As partículas foram classificadas seguindo uma média aritmética em 18 *mesh* (1,5%), 20 *mesh*, (56%), 40 *mesh* (23,5%), 60 *mesh* (10%), e fundo com (9%). Uma mistura de partículas de vários tamanhos resulta na matéria-prima ideal. A densidade final do briquete é influenciada pelo tamanho inicial das partículas, sendo que uma matéria prima com granulometria muito baixa resulta em briquetes mais densos, contudo necessita de altas pressões e temperaturas para que as partículas se consolidem.

#### 4.3.2 Densidade a Granel

Os valores médios de densidade a granel dos resíduos moídos de poda de árvores, em kg/m<sup>3</sup>, encontram-se ilustrados na Figura 18.

Figura 18 – Densidade a Granel média (DG) dos resíduos moídos de podas de árvore



Legenda: (OSF) = Oiti Sem Folhas; (NSF) = Neem Sem Folhas; (MSF) = Manga Sem Folhas; (OCF) = Oiti Com Folhas; (NCF) = Neem Com Folhas e (MCF) = Manga Com Folhas.

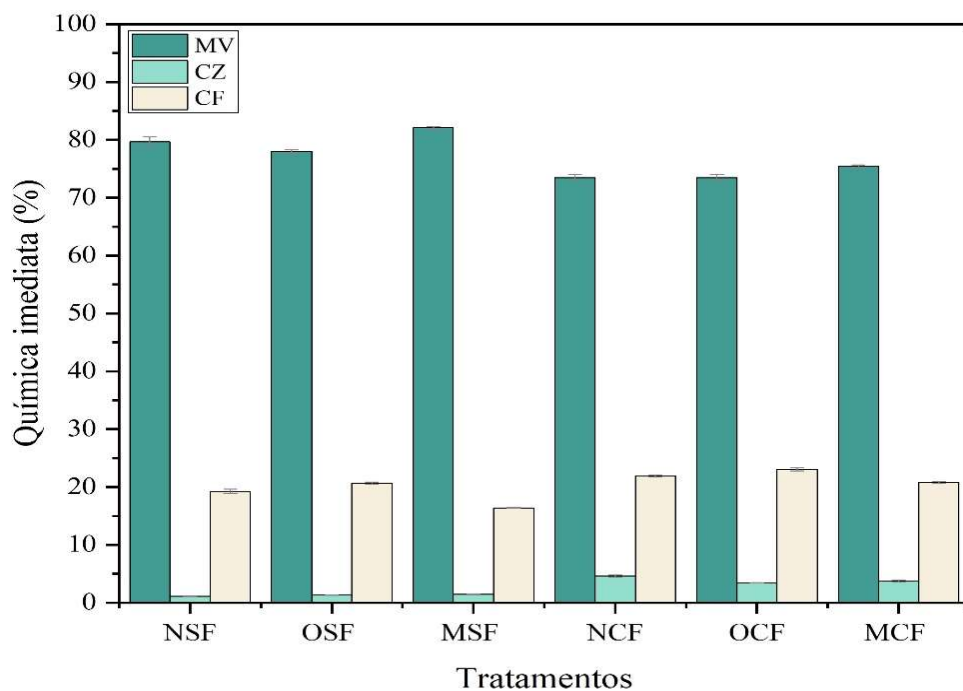
Fonte: Elaboração própria

A biomassa obtida a partir dos Resíduos de Poda Urbano (RPU) apresentou densidade a granel média de 274,74 kg/m<sup>3</sup> para os Tratamentos (NSF, OSF e MSF) e 297,66 kg/m<sup>3</sup> para os Tratamentos (NCF, OCF e MCF). A determinação da densidade a granel é de fundamental importância para gerar informações úteis para a logística e transporte da biomassa, uma vez que estima os dados reais dos volumes para o transporte.

### 4.3.3 Análise Química Imediata

Os valores médios para a análise química imediata dos seis tratamentos estudados, considerando, teor de materiais voláteis (MV%), o teor de cinzas (CZ%) e o teor de carbono fixo (CF%), encontram-se ilustrados na Figura 19.

Figura 19 – Materiais voláteis (MV), teor de cinza (CZ) e de carbono fixo (CF) da biomassa



Legenda: (OSF) = Oiti Sem Folhas; (NSF) = Neem Sem Folhas; (MSF) = Manga Sem Folhas; (OCF) = Oiti Com Folhas; (NCF) = Neem Com Folhas e (MCF) = Manga Com Folhas.

Fonte: Elaboração própria

Observa-se na Figura 20 que, com o maior teor de MV presente nos Tratamentos (NSF, OSF e MSF), médias entre 79,67 e 82,10%, pode-se inferir que os briquetes produzidos sem a adição de folhas irão incendiar com maior facilidade, se comparado aos briquetes com adição de folhas, que se refere aos Tratamentos (NCF, OCF e MCF) com médias entre 73,45 e 75,43%. Isto é, o teor de MV está relacionado à reatividade da biomassa à queima, ou seja, à facilidade

de ignição da biomassa devido à volatilização de substâncias do material durante o aquecimento.

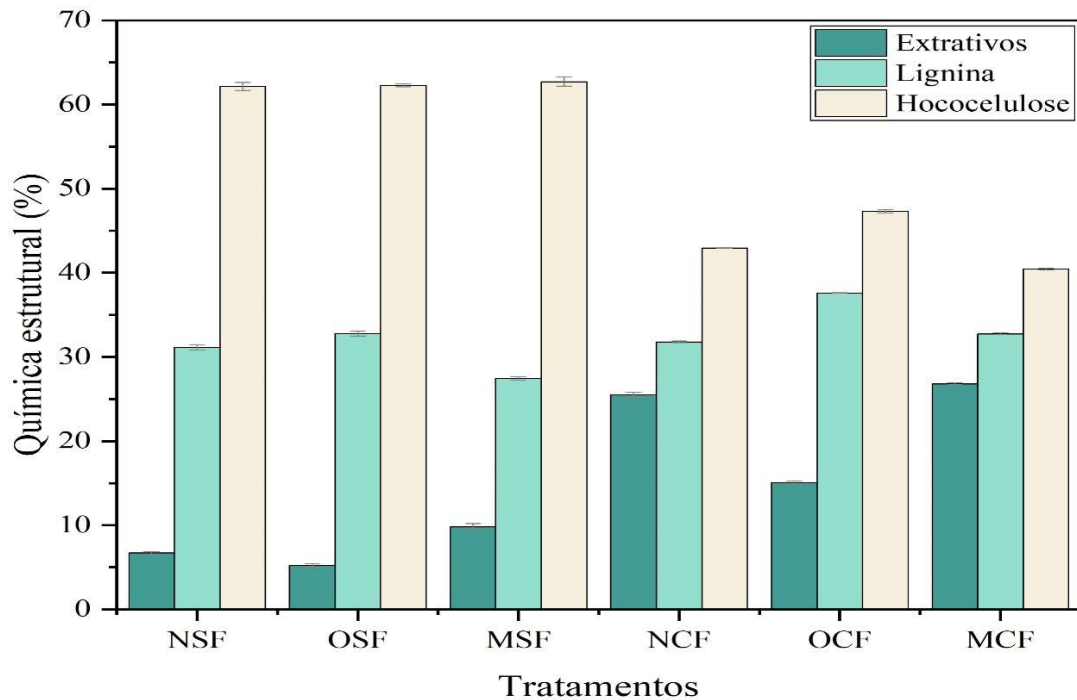
Com o menor teor de CZ presente nos Tratamentos (NSF, OSF e MSF) médias entre 1,10 e 1,50%, percebe-se que os briquetes produzidos sem a adição de folhas são mais eficazes do ponto de vista energético, para esse parâmetro, comparado aos Tratamentos (NCF, OCF e MCF) com médias entre 3,45 e 4,63%. A cinza é composta por materiais inorgânicos que não se queimam e, portanto, não liberam energia na forma de calor, apresentando uma relação inversa com o poder calorífico. Entretanto, alto teor de CZ implica maior frequência e custo com manutenção. Contudo, considerando que os resíduos da arborização são compostos por folhas, galhos finos e galhos médios, podados e triturados de maneira conjunta, sem a separação entre as frações coletadas, o aproveitamento para fins energéticos ainda é uma excelente opção para esse resíduo.

Os Tratamentos (NCF, OCF e MCF) possuem maior quantidade de CF, médias entre 20,81 e 23,08%, comparado aos Tratamentos (NSF, OSF e MSF) medindo entre 16,40 e 20,60%. A vantagem para maiores valores de carbono fixo se dá devido a liberação mais lenta da energia, implicando em maior tempo de residência nos fornos em comparação com outros que tenham menor teor de carbono fixo. Os resultados para o teor de CF para este estudo implica em uma compensação energética, comparado ao teor de CZ. Onde há uma perda energética devido ao teor de CZ mais elevado, todavia há uma maior permanência nos fornos devido ao maior teor de CF.

#### **4.3.4 Análise Química Estrutural**

A análise química estrutural para os Resíduos de Poda Urbano (RPU) apresentou valores médios para o teor Total de Lignina, Teor de Extrativos e Teor de Holocelulose conforme apresentado na Figura 20.

**Figura 20 – Análise química estrutural: Total de Lignina, Teor de Extrativos e Teor de Holocelulose**



Legenda: (OSF) = Oiti Sem Folhas; (NSF) = Neem Sem Folhas; (MSF) = Manga Sem Folhas; (OCF) = Oiti Com Folhas; (NCF) = Neem Com Folhas e (MCF) = Manga Com Folhas.

Fonte: Elaboração própria

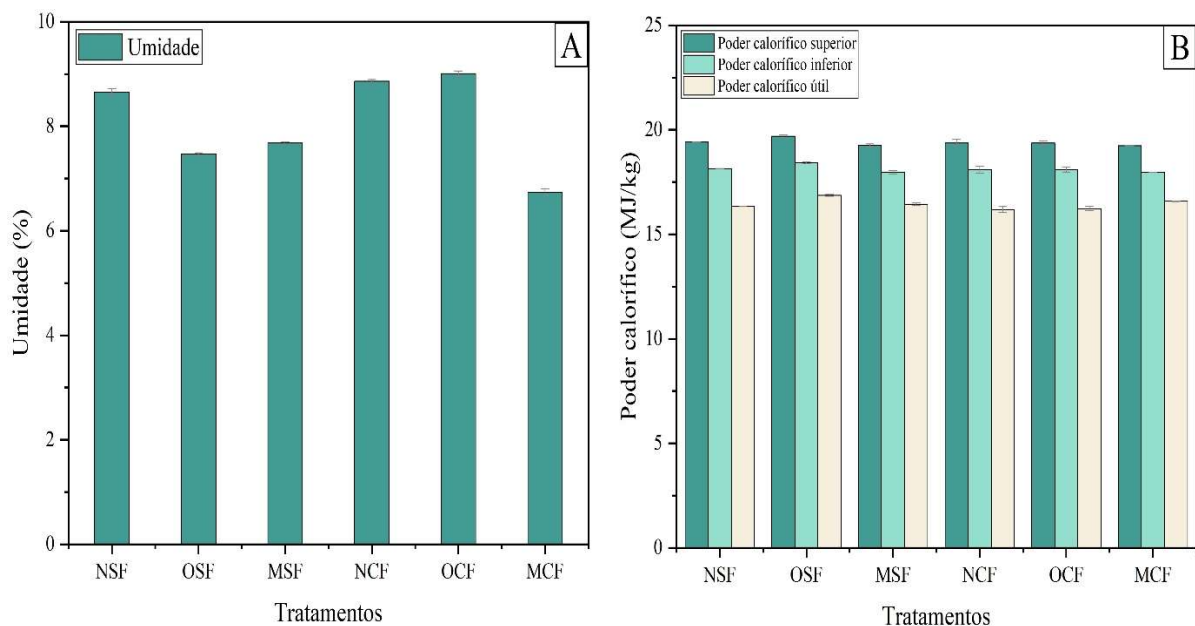
Os Tratamentos (NSF, OSF e MSF) sem folhas possuem teor de extrativos totais de 6,73 a 9,80%, e lignina entre 27,47 e 32,77%, estando na faixa de valores encontrados na literatura em diferentes espécies destinadas à produção de energia. O Tratamentos (NCF, OCF e MCF) com folhas, contém teor de extrativos (15,07 a 26,81%) e lignina (31,80 a 37,60%), bem acima do encontrado na literatura, isto implica que os briquetes com adição de galhos finos e folhas, apesar de possuir um alto teor de CZ, compensa seu poder calorífico pela quantidade excessiva de extrativos totais e lignina. O fato é que as ligninas e os extrativos possuem baixo grau de oxidação e alto calor de combustão, que podem aumentar o poder calorífico e o potencial energético dos resíduos.

Considerando a madeira como biomassa para uso energético, algumas características estruturais da madeira apontam o seu potencial energético. Altos valores de densidade básica e teor de lignina na madeira, associado com baixos valores de cinzas e holocelulose, são mais desejáveis para a geração de bioenergia. O teor de extrativos e o teor de lignina além de ajudar no poder calorífico da biomassa, são componentes que ajudam na adesão de partículas, quando em temperaturas elevadas.

### 4.3.5 Poder Calorífico

O poder calorífico pode ser analisado na forma de Poder Calorífico Superior (PCS), Poder Calorífico Inferior (PCI) e Poder Calorífico Útil (PCU). Na Figura 21A e 21B são apresentados os resultados para PCS, PCI e PCU com base na umidade (U) dos Tratamentos, após secagem e processamento.

**Figura 21 – Teor de umidade (U), poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico útil (PCU) dos resíduos de Biomassa**



Legenda: (OSF) = Oiti Sem Folhas; (NSF) = Neem Sem Folhas; (MSF) = Manga Sem Folhas; (OCF) = Oiti Com Folhas; (NCF) = Neem Com Folhas e (MCF) = Manga Com Folhas.

Fonte: Elaboração própria

Observa-se que os valores médios de teor de umidade encontrados para os tratamentos (NSF, OSF e MSF) mediram entre 7,47 e 8,66%. Já os tratamentos (NCF, OCF e MCF) apresentaram teor de umidade entre 6,74 e 9,00%. O teor de umidade é considerado uma das características mais relevantes ao se utilizar biomassa para a geração de energia, pois o valor do poder calorífico é inversamente proporcional à quantidade de água presente no material

Os Resíduos de Poda Urbano (RPU) apresentaram PCS médios de 19,39 MJ/kg, PCI médios de 18,10 MJ/kg e PCU de 16,43. Estes resultados estão de acordo com resultados encontrados por outros autores que avaliaram o potencial energético da biomassa como combustível sólido. É notória a similaridade obtida nos valores de poder calorífico para as amostras, o que aponta semelhança energética para os Seis Tratamentos.



#### 4.3.6 Matriz de Correlação da Caracterização da Biomassa

A Figura 22 apresenta matriz de correlação para as variáveis químicas e energéticas relacionadas a biomassa.

Figura 22 – Matriz de correlação de Pearson para as variáveis da biomassa



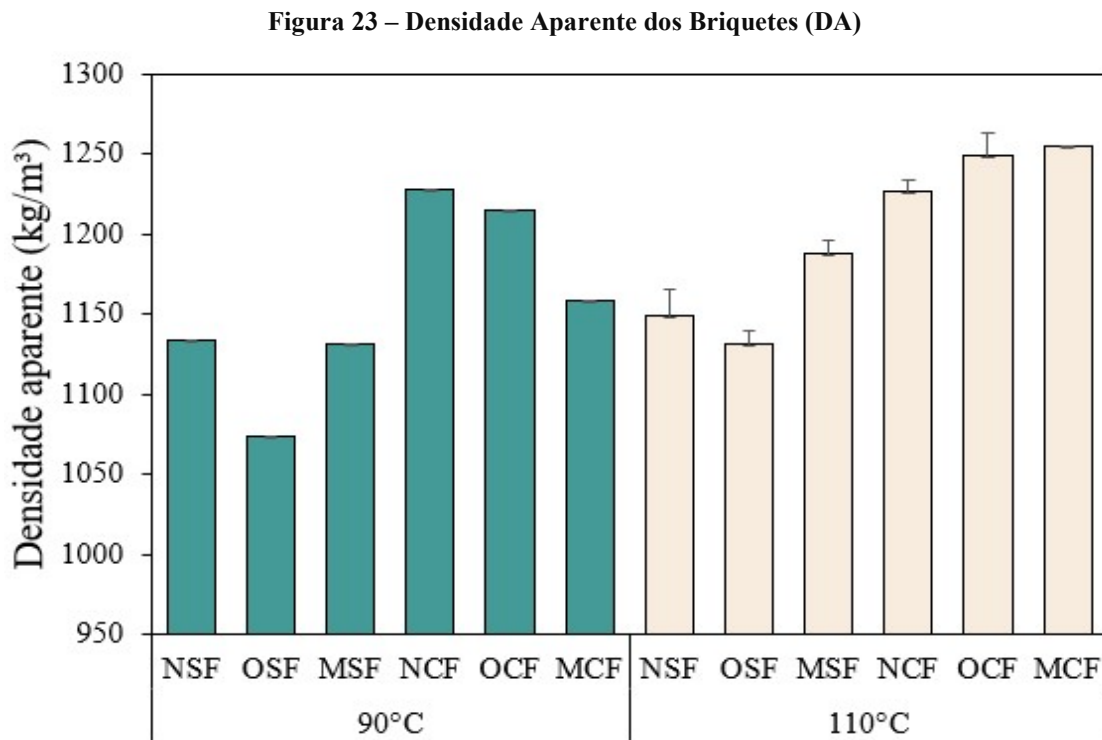
Fonte: Elaboração própria

Observa-se que diversas variáveis envolvidas no estudo da biomassa se relacionam entre si. Observa-se, que quando há um aumento no teor de umidade (U), maior será o consumo de energia necessário para a evaporação da água presente na biomassa, reduzindo o poder calorífico útil (PCU). Por essa razão foi necessário secar as partículas dos resíduos ao ar livre, visando aumentar o seu potencial calorífico. Observa-se, que quando há um aumento no teor de materiais voláteis (MV), diminui-se o teor de carbono fixo (CF). Percebe-se também, que quando há um aumento da densidade a granel (DG), conseqüentemente, há um aumento significativo na densidade energética (DE). Observou-se através da matriz de correlação, que quanto menor é o teor de cinzas (CZ), maior será o teor de extrativos e conseqüentemente será maior o poder calorífico útil (PCU).

## 4.4 Caracterização dos Briquetes

### 4.4.1 Densidade Aparente dos Briquetes

Os valores médios de densidades aparente dos briquetes de resíduos de poda de árvores, em  $\text{kg/m}^3$ , encontram-se ilustrados na Figura 23.



Legenda: (OSF) = Oiti Sem Folhas; (NSF) = Neem Sem Folhas; (MSF) = Manga Sem Folhas; (OCF) = Oiti Com Folhas; (NCF) = Neem Com Folhas e (MCF) = Manga Com Folhas.

Fonte: Elaboração própria

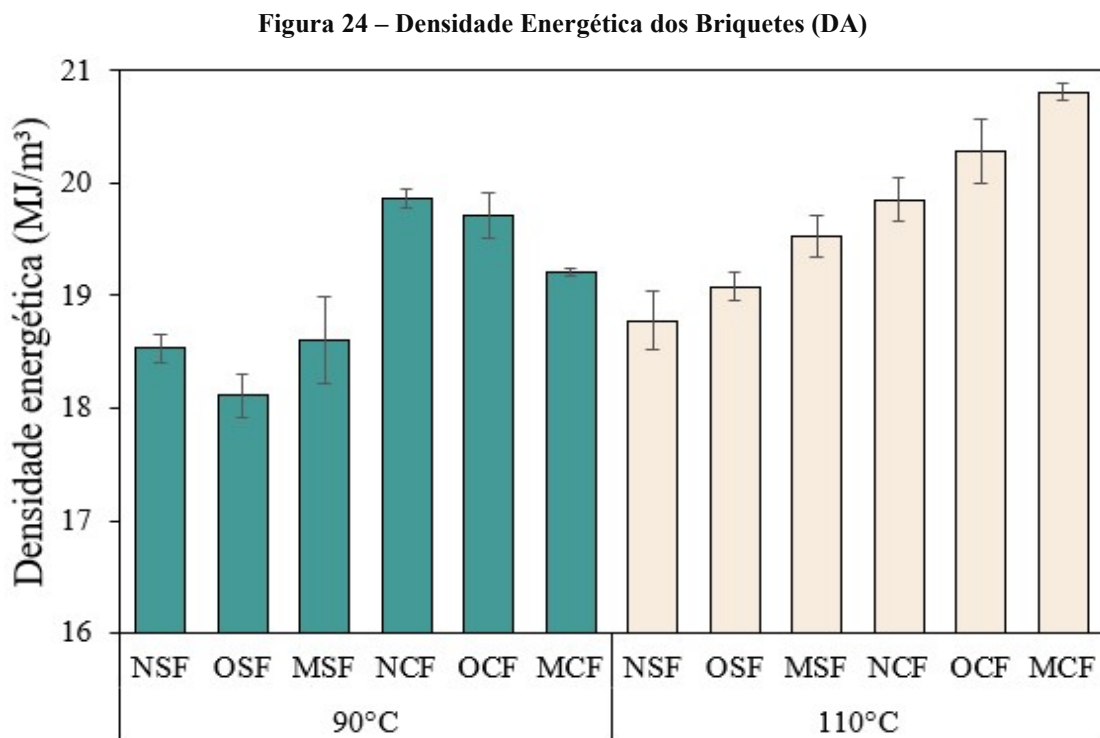
Os briquetes produzidos apresentaram densidade aparente média de  $1.156,5 \text{ kg/m}^3$  para a condição de  $90^\circ\text{C}$  e  $1.199,6 \text{ kg/m}^3$  para condição de  $110^\circ\text{C}$ . O valor encontrado é considerado alto, sendo essa uma característica desejável quando se trabalha com combustíveis sólidos para geração de energia na forma de calor.

Observa-se um aumento na ordem de 4,04 vezes da densidade após a briquetagem (na condição de  $90^\circ\text{C}$ ) e 4,20 vezes na condição de  $110^\circ\text{C}$ . A densificação da biomassa através da produção dos briquetes, promove um aumento na densidade da biomassa *in natura*; este incremento da densidade após a compactação, evidencia a importância dos processos de compactação da biomassa para o melhor aproveitamento de materiais lignocelulósicos para a produção de bioenergia, pois o aumento na densidade dos briquetes representa uma diminuição

do volume das biomassas, proporcionando uma maior concentração de massa em um mesmo espaço.

#### 4.4.2 Densidade Energética dos Briquetes

A Figura 24 apresenta os valores médios da densidade energética (DA) dos briquetes ( $\text{MJ}/\text{m}^3$ ), dentro dos respectivos tratamentos.



Legenda: (OSF) = Oiti Sem Folhas; (NSF) = Neem Sem Folhas; (MSF) = Manga Sem Folhas; (OCF) = Oiti Com Folhas; (NCF) = Neem Com Folhas e (MCF) = Manga Com Folhas.

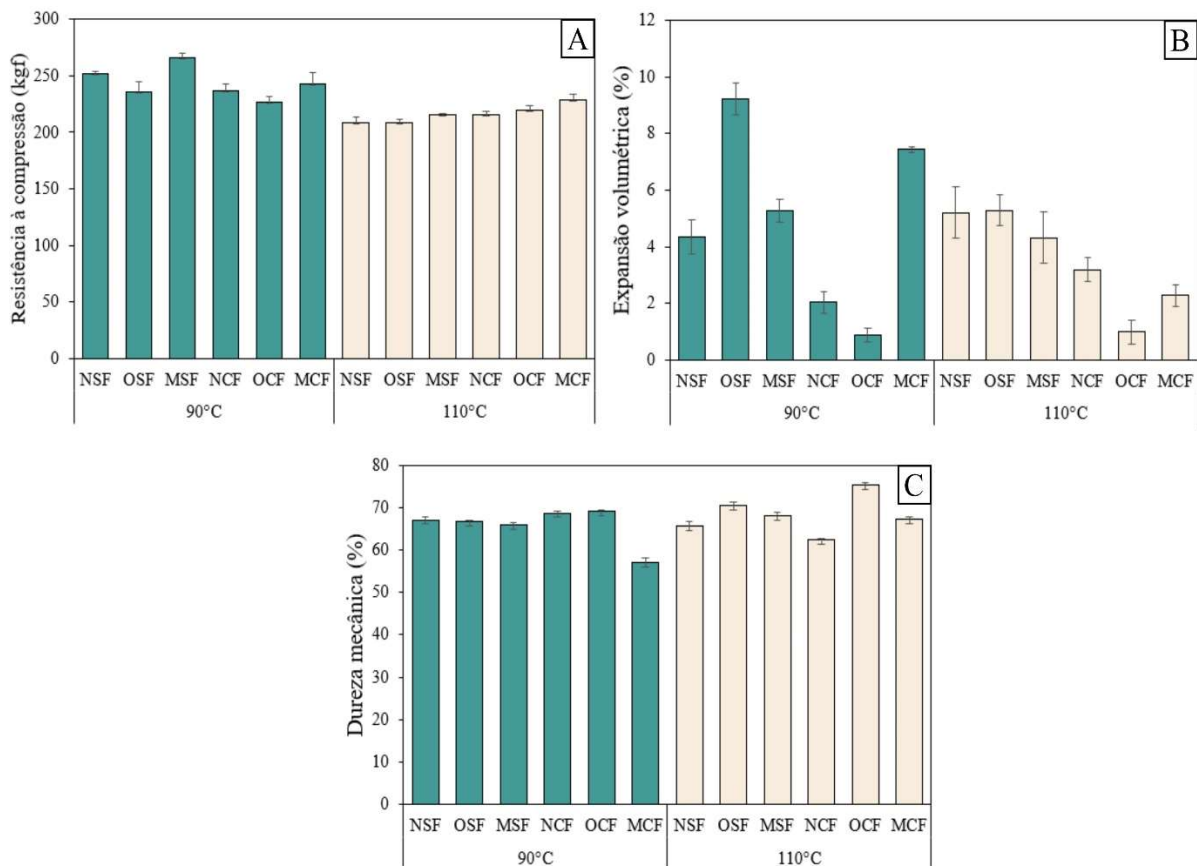
Fonte: Elaboração própria

Os briquetes produzidos apresentaram densidade energética média de  $19,00 \text{ MJ}/\text{m}^3$  para a condição de  $90^\circ\text{C}$  e  $22,82 \text{ MJ}/\text{m}^3$  para condição de  $110^\circ\text{C}$ . Da mesma forma do observado para a densidade aparente (DA), após a compactação da biomassa, observou-se o aumento da densidade energética, evidenciando a importância da briquetagem no aproveitamento de resíduos lignocelulósicos para geração de energia, conforme já mencionado. Esse aumento ocorreu em função do aumento da densidade da biomassa ocasionado pela compactação, uma vez que o valor de PCS se mantém constante.

#### 4.4.3 Resistências Mecânicas, Expansão Volumétrica e Dureza Mecânica dos Briquetes.

Nas figuras 25A, 25B e 25C são apresentadas as correlações entre as Resistências Mecânicas (RTCD), Expansão Volumétrica (EV) e Dureza Mecânica (DM) dos Briquetes.

**Figura 25 – Resistência à Compressão (RTCD), Expansão Volumétrica (EV) e Dureza Mecânica (DM) dos Briquetes**



Legenda: (OSF) = Oiti Sem Folhas; (NSF) = Neem Sem Folhas; (MSF) = Manga Sem Folhas; (OCF) = Oiti Com Folhas; (NCF) = Neem Com Folhas e (MCF) = Manga Com Folhas.

Fonte: Elaboração própria

Com relação a resistência mecânica a compressão, os valores obtidos foram em média 243,09 kgf para os briquetes na condição de 90°C e 216,00 kgf na condição de 110°C. Nota-se uma diminuição da resistência à compressão diametral do briquete, com o aumento da temperatura (contudo, para as duas condições de temperatura, os valores foram satisfatórios). A resistência a tração por compressão diametral é medida pela resistência do briquete quanto ao choque e/ou atrito e corresponde a postura do material quanto ao desgaste mecânico,

provocando a geração de partículas finas ou poeiras ao longo do transporte, transbordo e armazenagem, as quais representam um inconveniente para o consumidor e uma ameaça para a saúde.

Com relação a expansão volumétrica, nota-se um aumento em média de 5,60% para os briquetes produzidos sem a adição das folhas (NSF, OSF e MSF) e 2,80% para os briquetes com folhas (NCF, OCF e MCF). Os briquetes devem ser avaliados quanto: às imperfeições visuais, expansão volumétrica e ganho de umidade. Quanto menor é a expansão volumétrica, melhor é a qualidade dos briquetes. Os briquetes produzidos sem adição de folhas apresentaram um incremento médio de 0,22g, isso equivale a 1,2% à massa do briquete. Os briquetes produzidos com a adição de folhas apresentaram um incremento médio de 0,11g, isso equivale a 0,60% à massa do briquete. Nota-se que os briquetes produzidos com a adição de folhas obtiveram menor índice de adsorção comparado aos briquetes sem a presença de folhas. O ensaio de adsorção é necessário, pois contribui na percepção de poros presente nos briquetes após a produção. Contribui ainda para analisar as condições de expansão volumétrica.

Os valores de dureza mecânica encontrados foram em média 65,74 para a condição de 90°C e 68,96 para condição de 110°C. A dureza mecânica aumentou em média 3% para os briquetes produzidos à temperatura de 110° C. O qual evidenciou valores de durabilidade um pouco maior com o aumento da temperatura no termostato da briquetadeira.

#### **4.4.4 Colorimetria dos Briquetes**

Os resultados para análise dos briquetes sem a adição de folhas, apresentaram médias de 67,54 para claridade (L), 5,60 para a coordenada vermelho-verde (a) e 19,94 para coordenada azul-amarelo (b). Os resultados obtidos para os briquetes com a adição de folhas, apresentaram médias de 52,33 para claridade (L), 4,73 para a coordenada vermelho-verde (a) e 20,37 para coordenada azul-amarelo (b). De acordo com o sistema de cor CIELab, há uma diminuição da claridade nos briquetes com a adição de folhas. A cor dos briquetes é influenciada pela matéria-prima utilizada para a sua produção, tais características podem afetar a qualidade do produto final.

Briquetes feitos de madeira pura são mais claros e têm baixo teor de cinzas. Enquanto os briquetes feitos de diferentes misturas de madeira e casca ou folhagem são geralmente mais escuros e possuem alto teor de cinzas. Parâmetros colorimétricos podem ser uma importante ferramenta para prever a qualidade de produtos. Parâmetros colorimétricos podem ser uma importante ferramenta para prever a qualidade da madeira, também vem sendo utilizado para

conferir a qualidade dos briquetes e seus parâmetros de energia. Portanto esse critério pode ser usado como suporte visual de qualidade para o consumidor final.

#### 4.4.5 Matriz de Correlação da Caracterização dos Briquetes

A Figura 26 apresenta matriz de correlação para as variáveis químicas e energéticas relacionadas aos briquetes.

Figura 26 – Matriz de correlação de Pearson para as variáveis dos briquetes



Fonte: Elaboração própria

Observa-se que diversas variáveis envolvidas no estudo dos briquetes se relacionam entre si. Nota-se que quando há um ganho aumento na Expansão Volumétrica (EV), há uma diminuição na Densidade Aparente (DA) e com isso, uma diminuição na densidade Energética. Percebe-se que quando há um ganho na densidade aparente, há um aumento significativo na densidade energética.

#### 4.5 Análise preliminar de um Centro de Processamento de Biomassa (briquetes)

Foi efetuada uma análise técnico-econômica para a implantação de uma usina de briquetes, dos resíduos de poda de poda de árvore provenientes da Empresa Energisa Tocantins

em Palmas. Neste desenvolvimento foi analisado: o regime de trabalho; a capacidade de produção de acordo com a quantidade de resíduos; o investimento inicial para a capacidade de produção; as estruturas de custos operacionais (fixo e variáveis) e; os indicadores técnico-econômicos da Usina.

#### 4.5.1 Capacidade de Produção

O modelo dos equipamentos foi escolhido de acordo com a produção de resíduos da Energisa nos vinte maiores municípios do estado, uma vez que a geração de resíduos foi estimada em 9.400 ton/ano, 783,34 ton/mensais e 35,60 ton/dia para o ano de 2021. Considerando o custo anual dos serviços de poda, coleta e transporte de R\$ 2.500.000,00, estima-se um valor de R\$ 265,96 por tonelada coletada de biomassa. Atendendo um total de 2.112 horas de trabalho anuais a capacidade de processamento é de 4,45 t/hora de resíduos a serem processados. Para a Usina de briquetes, o modelo foi selecionado de acordo com a capacidade máxima de produção fornecida pelo fabricante, com processamento de 6-8 t/h de resíduos. A usina tem capacidade para atender maior volume que o produzido, pois estima-se crescimentos futuros. Os preços dos equipamentos estão apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6 – Preço dos equipamentos industriais para usina de briquetes.**

<b>Equipamentos Industriais</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Custo Unitário (R\$)</b>	<b>Custo Total (R\$)</b>
Moinhos Martelo 700kg/h - 2 Motores 15cv	01	46.000,00	46.000,00
Picador de disco modelo TP-400 Pinheiro	01	69.000,00	69.000,00
Redler de entrada	01	40.000,00	40.000,00
Chupim do secador	01	30.000,00	30.000,00
Secador tambor B 20000	01	320.000,00	320.000,00
Chupim da briquetadeira	01	20.000,00	20.000,00
Sistema automático de alimentação da fornalha	01	50.000,00	50.000,00
Silo/dosador aéreo da briquetadeira	01	35.000,00	35.000,00
briquetadeira B 115/220	01	250.000,00	250.000,00
Motor principal da briquetadeira (100 CV)	01	20.000,00	20.000,00
Quadro de comando da usina	01	20.000,00	20.000,00
<b>Total</b>			<b>900.000,00</b>

Fonte: Elaboração própria

Para implantação de uma usina são necessários gastos com instalações industriais como eletricidade, água, telefone, entre outras. Estima-se o custo dessas instalações em 10% do valor do maquinário e equipamento, conforme adotado por Rodrigues *et al.* (2015). Para a aquisição de máquinas, móveis e materiais de escritório foi estimado um investimento de R\$ R\$ 50.000,00.

Quanto a Construção Civil o custo médio por metro quadrado é de R\$ 1.715,13, referente ao material e à mão-de-obra no Estado do Tocantins (IBGE, 2021). Assim, a construção da área de um galpão para Usina de briquetes com 200 m<sup>2</sup> (galpão de estoque e área para equipamentos) resultará em um custo de R\$ 343.026,00.

A Tabela 7 apresenta o valor total do investimento inicial que deve ser feito para a implantação do projeto e a depreciação anual dos bens. A depreciação dos ativos que é o custo da perda de valor devido ao desgaste, sendo de 10 % para máquinas, móveis e utensílios e 4% para edifícios, determinados pela Receita Federal do Brasil e adotado em estudos realizados por Rodrigues *et al.* (2015).

**Tabela 7: Estimativa de investimento inicial para implantação das tecnologias.**

<b>Investimento</b>	<b>Custo (R\$)</b>	<b>Depreciação Anual</b>
Equipamentos Industriais	900.000,00	90.000,00
Instalação Industrial	85.400,00	8.540,00
Móveis e Equipamentos	50.000,00	5.000,00
Edificação Galpão 200 m <sup>2</sup> (R\$ 1.715,13/m <sup>2</sup> )	343.026,00	34.302,60
<b>Custo Total</b>	<b>1.378.426,00</b>	<b>137.842,6</b>

Fonte: Elaboração própria

#### **4.5.2 Custo com manutenção**

O consumo anual de energia da Usina é de 422.400 kWh/ano. A modalidade tarifária para a demanda e consumo de energia elétrica é a Tarifa Verde A4, fora ponta, com custo de 0,35082 R\$/kWh (ANEEL, 2022). Esta modalidade diz respeito a tarifa única para a demanda de potência, tensão de fornecimento inferior a 69 kV e demanda contratada igual ou superior a 300 kW (ANEEL, 2022). Assim o custo anual com energia elétrica é de R\$ 148.199,04 sem contabilizar os impostos, conforme Tabela 8.



**Tabela 8: Capacidade produtiva da usina de briquetes.**

Produção Máxima Ton/hora	Potência (KW)	Potência Anual (KWh/ano)
4,3	200	148.199,04

Fonte: Elaboração própria

O custo da embalagem adotado por Rodrigues *et al.* (2015) para cada tonelada se gasta cerca de R\$ 25,00, assim estima-se um gasto anual de R\$ 227.040,00 para Usina de briquetes. As despesas em manutenção são estimadas como 2% do custo dos equipamentos, e as despesas administrativas como 5% do total das despesas administrativas (RODRIGUES *et al.* 2015).

Será necessária a locação de uma pá carregadeira, para manobro da biomassa e carregamento do material triturado até o *Redler* de entrada. O custo mensal da locação é de R\$ 32.000,00 para 200 h, incluindo o operador da máquina. A locação não inclui custo com combustível, considerando o consumo de 20 L/h de óleo diesel a R\$ 5,588/L, o total anual gasto com combustível é de R\$ 236.037,12 para Usina de briquetes.

Estima-se que o custo da mão-de-obra industrial para Usina de briquetes inclui o pagamento de 6 funcionários, responsáveis por auxiliar no carregamento da biomassa à máquina trituradora, operar a máquina e logística dos briquetes, e funcionário administrativo. Para um salário de R\$ 1.212,00 mensal, o total anual equivale a uma folha de pagamento de R\$ 130.896,00 incluindo-se os encargos sociais e demais benefícios, que foram calculados em aproximadamente 50% do valor do salário pago.

Analisando os custos anuais (fixos e variáveis) na fabricação do biocombustível sólido, o custo unitário para fabricação de 1 (uma) tonelada de briquetes é cerca de R\$ 431,40/ton, com o ICMS incluso (18% ICMS/TO). O valor do investimento inicial não está incluso nos custos anuais. Conforme estudos realizados por Rodrigues *et al.* (2015) exposto na Tabela 9.

**Tabela 9: Estrutura custo operacional para o tratamento de 9.400 ton/ano de resíduos.**

<b>Especificação</b>	<b>Custos (R\$/ano)</b>
<b>Custos Fixos</b>	<b>2.689.422,6</b>
Poda e Trituração dos galhos na Rede de Distribuição	2.500.000,00
Depreciação Industrial	137.842,6
Locação de Pá carregadeira	32.000,00
Manutenção	17.080,00
Outras despesas Administrativas	2.500,00
<b>Custos Variáveis:</b>	<b>747.172,16</b>
Combustível e lubrificantes	236.037,12
Energia	148.199,04
Eventuais	5.000,00
Mão-de-obra	130.896,00
Material de embalagem	227.040,00
<b>Total Geral</b>	<b>931.994,76</b>
<b>Custo Unitário (R\$/t):</b>	<b>103,56</b>

Fonte: Elaboração própria

Para o biocombustível sólido, foi considerado o preço de venda, observados no mercado nacional. O preço de venda dos briquetes considerado para cálculo foi de R\$ 600,00/ton para uma produção anual de 9.400 ton/ano. A Tabela 10 apresenta os valores da Receita Bruta (RB), o Lucro Operacional (LO), o Ponto de Equilíbrio Operacional (PE) e O Grau de Alavancagem Operacional (GAO).

**Tabela 10: Indicadores técnico-econômicos da Usina de briquetes.**

<b>R\$/ton</b>	<b>Produção (ton/ano)</b>	<b>RB (R\$)</b>	<b>PE (%)</b>	<b>LO (R\$)</b>	<b>GAO</b>	<b>PE (ton)</b>	<b>Cont. (R\$/ton)</b>
600,00	9.400	5.640.000,00	55	2.203.405,24	2,22	5.170	517,27

Fonte: Elaboração própria

Verificou-se que, para a Usina de briquetes quando é praticado o preço de R\$ 600,00/t, a receita bruta é de R\$ 5.6400.000,00. A fábrica opera com PE de 55%, logo, o volume de lucro mínimos acontecerá a partir de 55% da produção nominal. Observou-se através do grau de alavancagem operacional, que com um aumento de 10% no nível de atividades da fábrica corresponderá a um aumento de 22,2% no lucro operacional. De acordo com o ponto de equilíbrio, a quantidade que a empresa precisa vender para cobrir o custo das mercadorias vendidas, as despesas variáveis e as despesas fixas serão 5.170 toneladas. O valor total das

despesas fixas (CF), dividido pelo valor em toneladas do ponto de equilíbrio, obtêm-se a margem de contribuição por tonelada de R\$ 520,20/ton.

#### 4.6 Estimativa de energia gerada pelos resíduos de biomassa

O poder calorífico útil (PCU) médio dos Tratamentos estudados é de 16,44 MJ/kg. O volume médio de biomassa estimado na Empresa Energisa Tocantins é de 9.400 ton/ano, isso equivale a 783,33 ton/mês. A estimativa de energia térmica e energia elétrica gerada pelos resíduos de poda de árvore da Energisa Tocantins pode ser vista na Tabela 11.

**Tabela 11: Estimativa da quantidade de biomassa (ton/mês), equivalente em MJ/kg/mês e equivalente em MWh/mês.**

Quantidade de Biomassa (ton/mês)	Equivalente em MJ/kg mês	Eficiência de Conversão de Energia %	Equivalente em MWh/mês
783,33	12.877.945,20	75	2.682,9

Conversão termoelétrica  
1,0 MWh = 3878 MJ  $\approx$  200 kg de briquetes

Fonte: Elaboração própria

De acordo com o Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2022 (ano base 2021), o consumo de energia elétrica na classe residencial em 2021 para a Região Norte do Brasil é de 182,8 kWh/mês (EPE, 2022b). Constata-se com esses dados, que a energia elétrica gerada através dos resíduos arbóreos da Energisa Tocantins, pode suprir a demanda por energia de 14.676 residências com consumo médio de 182,8 kWh/mês.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do presente estudo, com relação ao levantamento quantitativo do volume estéreo de biomassa proveniente da manutenção da Rede de Distribuição da Energisa Tocantins, para o período estudado, mostra que 9.600 toneladas de biomassa é um valor expressivo, tendo em vista o seu potencial para uso energético.

Com base na avaliação das espécies mais frequentes em conflito com a rede elétrica nas vinte maiores cidades do Estado, optou-se por três, para representar as 145 espécies mapeadas na arborização urbana em conflito com a rede: *Licania tomentosa* Benth. Fritsch (oiti), *Mangifera indica* L. (manga) e *Azadirachta indica* (Neem-indiano). Entende-se que maiores estudos serão necessários para avaliar o planejamento da infraestrutura urbana e a implantação da arborização no Estado, a fim de aproveitar ao máximo este insumo para fins energéticos.

Os resíduos de *Licania tomentosa* Benth Fritsch (Oiti), *Mangifera indica* L. (manga) e *Azadirachta indica* (Neem-indiano), possuem grande potencial para reaproveitamento energético de acordo com seu poder calorífico superior, considerado satisfatório para a geração de energia. Deve ser levado em consideração o teor de umidade desses materiais quanto forem utilizados para essa finalidade devido a sua influência sobre o poder calorífico do material. A análise química imediata, análise química estrutural, Densidade Energética e resistência mecânica atendem aos requisitos mínimos exigidos nas normas para biocombustíveis sólidos (briquetes), portando são adequados.

No tocante a análise preliminar de um Centro de Processamento de Biomassa (briquetes), denotou-se que este estudo é factível, do ponto de vista social e ambiental pois contribui com a geração de emprego e preservação do meio ambiente. Estima-se que a quantidade de energia térmica ou elétrica gerada com a utilização deste insumo seja viável do ponto de vista econômico, pois com este resíduo, poderia suprir a demanda de energia elétrica de 22 mil famílias com consumo médio comparado ao da Região Norte do País. Uma proposta aproveitamento deste insumo será apresentada ao Grupo Energisa Tocantins.

São indicados estudos futuros sobre outras propriedades (físicas e químicas) que também são importantes para a classificação energética dos materiais, bem como estudos mais aprofundados sobre análise química estrutural (extrativos e lignina), e índice de combustão desses resíduos, tendo em vista um melhor aproveitamento energético. Indica-se também estudos logísticos dos resíduos de biomassa dentro do Estado do Tocantins para melhor escolha de locais para implantação de usinas de briquetes.

## REFERÊNCIAS

- ABIB – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE BIOMASSA E ENERGIA RENOVÁVEL. **Biomassa e energia renováveis**. Curitiba, 2016. Disponível em: <https://www.biomassabioenergia.com.br/>. Acesso em: 11 junho 2022.
- AHN, B. J. *et al.* **Effect of binders on the durability of wood pellets fabricated from Larix kaemferi C. and Liriodendron tulipifera L. sawdust**. Renewable Energy, v. 62, p. 18–23, fev. 2014.
- AMBAYE, T. G. *et al.* **Emerging technologies for biofuel production: A critical review on recent progress, challenges and perspectives**. Journal of Environmental Management. Academic Press, , 15 jul. 2021.
- AMORIM, F. S. *et al.* **Produção de briquetes a partir de espécies florestais**. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, v. 10, n. 2, p. 34, 5 nov. 2015.
- ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 4. Ed. Brasília, 2020. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/>. Acesso em: 10 abr. 2022.
- ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Fórum de energias renováveis**. Brasília, 2020. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/>. Acesso em: 01 de junho de 2022.
- ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Modalidades Tarifárias**. Brasília, 2022. Disponível em: < <https://www.aneel.gov.br/tarifas-consumidores>>. Acesso em: 01 de julho de 2022.
- CENBIO – CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA. **Perspectivas do setor de biomassa de madeira para a geração de energia**. Universidade de São Paulo. 2020.
- COSENZA, J. P.; DE ANDRADE, E. M.; DE ASSUNÇÃO, G. M. **A circular economy as an alternative for Brazil's sustainable growth: Analysis of the national solid waste policy**. Revista de Gestao Ambiental e Sustentabilidade, v. 9, n. 1, p. 1–30, 2020.
- SOUZA, E. C. *et al.* **Reaproveitamento de resíduos da arborização urbana como uma alternativa sustentável para geração de energia. Slow pyrolysis and direct combustion of planted and natural wood View project Bioproducts from forest base View project**. 2021. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/359410259>>. Acesso em: 01 de outubro de 2022.
- DA SILVA, D. A. *et al.* **Caracterização de biomassas para a briquetagem**. Floresta, v. 45, n. 4, p. 713–722, 2015.
- DE CARVALHO, N. R. *et al.* **Physical and chemical characterization of biomass used as solid fuel in a boiler**. Quimica Nova, v. 44, n. 1, p. 35–40, 2021.
- DE MORAES, M. D. A. *et al.* **Bioenergia com resíduos do desdobro da madeira de Pinus caribaea var.** Revista de Ciências Agrárias, v. 42, n. 2, p. 520–527, 2019.

- DE SOUZA, H. J. P. L. *et al.* **Pelletization of eucalyptus wood and coffee growing wastes: Strategies for biomass valorization and sustainable bioenergy production.** *Renewable Energy*, v. 149, p. 128–140, 1 abr. 2020.
- DE SOUZA, N. D. *et al.* **Estudo de caso de uma planta de carbonização: Avaliação de características e qualidade do carvão vegetal visando uso siderúrgico.** *Floresta e Ambiente*, v. 23, n. 2, p. 270–277, 2016.
- DIAS JÚNIOR, A. F.; ANDRADE, A. M.; Costa Júnior, D. S. **Caracterização de briquetes produzidos com resíduos agroflorestais.** *Brazilian Journal of Forestry Research*, p. 10, 2014.
- DIAS JÚNIOR, A. F. **Caracterização de Briquetes Produzidos com Resíduos Agroflorestais.** 2013.
- DIAS JÚNIOR, A. F. ; TAKESHITA, A. **Guia Prático de instalação e Utilização de Bomba Calorimétrica modelo IKA C200.** Aracajú, 2017.
- DIAS JÚNIOR, A. F.; BRITO, J. O.; ANDRADE, C. R. **Influência da granulometria na combustão do carvão vegetal utilizado para cocção de alimentos.** *Revista Arvore*, v. 39, n. 6, p. 1127–1133, 1 nov. 2015.
- ENERGISA. **Aproveitamento de Resíduos de Podas de Árvores para Produção de compostagem.** Adamantina, SP, 2018.
- ENERGISA, ND 016. **Compatibilização da Arborização com as Redes de Distribuição de Energia Elétrica.** João Pessoa, PB, 2021.
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Atlas de Eficiência Energética: Brasil.** Rio de Janeiro, RJ, 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/>>. Acesso em: 20 de julho de 2022.
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Boletim Energético Nacional: Relatório Síntese 2022.** Rio de Janeiro, RJ, 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Publicacoes>>. Acesso em: 01 de julho de 2022.
- EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2022.** Rio de Janeiro, RJ, 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>>. Acesso em: 30 de a de 2022.
- GARCIA, D. P. *et al.* **Mapa dos Produtores Brasileiros de Biocombustíveis Pellets.** *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*, v. 12, n. 4, p. 333-339, 2018. Disponível em: <https://periodicos.ufpel.edu.br/>. Acesso em: 01 julho 2022.
- HU, Q. *et al.* **Effects of binders on the properties of bio-char pellets.** *Applied Energy*, v. 157, p. 508–516, 1 nov. 2015.
- LAVERGNE, S. *et al.* **Effect of process parameters and biomass composition on flat-die pellet production from underexploited forest and agricultural biomass.** *Fuel*, v. 302, 15 out. 2021.
- MAGALHÃES, M. A. DE *et al.* **Estimativas de propriedades energéticas de pellets**

**torrificados por meio de parâmetros colorimétricos.** Revista Ciência da Madeira - RCM, v. 10, n. 1, p. 29–30, 2019.

MAGALHÃES, W. L. E. *et al.* **Método de produção de briquetes de pupunha.** 2021.

MORAES, S. L. DE *et al.* **Cenário brasileiro da geração e uso de biomassa adensada.** Revista IPT | Tecnologia e Inovação, v. 1, n. 4, p. 58–73, 2017.

MURARA, M. I.; ROCHA, M. P. DA; TRUGILHO, P. F. **Estimativa do Rendimento em Madeira Serrada de Pinus para Duas Metodologias de Desdobro.** Floresta e Ambiente, 2013.

NAKASHIMA, G. T. *et al.* **Lignocellulosic materials: Characterization and production of briquettes.** Revista Virtual de Química. Sociedade Brasileira de Química, , 1 jan. 2017.

NDUMBO, M. **processo integrado para produção de xilana, briquetes e açúcares fermentáveis.** Instituto de biociências do Rio Claro. UNESP. São Paulo, 2021.

OLIVEIRA, L. H. *et al.* **Aproveitamento de resíduos madeireiros de Pinus sp. com diferentes granulometrias para a produção de briquetes.** Revista de Ciências Agrárias, v. 40, n. 3, p. 683–691, set. 2017.

PASSAGLIA, P. G.; COELHO, S. T.; ANATER, M. J. DO N. **Aproveitamento Energético de Resíduos de Poda no Campus Aeroporto da Universidade de Uberaba-Uniube.** BIOFIX Scientific Journal, v. 7, n. 2, p. 160, 5 jul. 2022.

PAULA, L. E. DE R. E *et al.* **Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos.** Pesquisa Florestal Brasileira, v. 31, n. 66, p. 103–112, 30 jun. 2011.

PEREIRA DA SILVA, D. *et al.* **Biomassa e tecnologias de adensamento para aplicação energética.** Revista Ipt Tecnologia E Inovação, v. 5, n. 16, p. 6–37, 2021.

PINHEIRO, R. T.; MARCELINO, D. G.; MOURA, D. R. **Arboreous composition and diversity in the urbanized blocks of palmas, Tocantins state.** Ciencia Florestal, v. 30, n. 2, p. 565–582, 2020.

PNRS - PROGRAMA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS. **Lei nº 12.305/2010.** Brasília, DF, 2022.

PROTÁSIO, T. DE *et al.* **Correlações Canônicas entre as Características Químicas e Energéticas de Resíduos Lignocelulósicos Canonical.** Lavras, MG, 2012.

QUÉNO, L. R. M. *et al.* **Aspectos técnicos da produção de pellets de madeira.** Revista Ciência Florestal, Santa Maria, v. 29, n. 3, p. 1.478-1.489, jul./set. 2019. Disponível em: <http://revista.ipt.br/>. Acesso em: 10 jun. 2020.

RAMOS, A. M. **Breves Considerações sobre a Política Nacional de Resíduos Sólidos e a atuação do Ministério Público.** MPTO. Palmas, TO, 2021.

SCHIRMER, W. N. *et al.* **Caracterização de biomassa residual de fábrica de papel-cartão para aproveitamento energético.** Revista em Agronegocio e Meio Ambiente, v. 10, n. 4, p. 1113–1132, 1 out. 2017.

- SETTE, C. R. *et al.* **Energy enhancement of the eucalyptus bark by briquette production.** *Industrial Crops and Products*, v. 122, p. 209–213, 15 out. 2018.
- SGARBOSSA, A. *et al.* **Colorimetric patterns of wood pellets and their relations with quality and energy parameters.** *Fuel*, v. 137, p. 70–76, 19 ago. 2014.
- SILVA, D. A. L. *et al.* **A systematic review and life cycle assessment of biomass pellets and briquettes production in Latin America.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 157, n. November 2021, p. 112042, 2022.
- SILVA, D. P. DA. **Avaliação do processo de adensamento de resíduos de poda de árvore visando ao aproveitamento energético: o caso do campus da USP na capital.** p. 124, 2016.
- TARASOV, D.; SHAHI, C.; LEITCH, M. **Effect of Additives on Wood Pellet Physical and Thermal Characteristics: A Review.** *ISRN Forestry*, v. 2013, p. 1–6, 14 fev. 2013.
- TENORIO, C. *et al.* **Application of the X-ray densitometry in the evaluation of the quality and mechanical properties of biomass pellets.** *Fuel Processing Technology*, v. 132, p. 62–73, 2015.
- TORRES, R. *et al.* **Conflitos Entre a Rede Elétrica e a Arborização das Ruas das Quadras Residenciais de Palmas, Tocantins.** Florianópolis, SC, 2021.
- TUMULURU, J. S. *et al.* **A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application.** *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, nov. 2011.
- WOLF, A.; VIDLUND, A.; ANDERSSON, E. **Energy-efficient pellet production in the forest industry - A study of obstacles and success factors.** *Biomass and Bioenergy*, v. 30, n. 1, p. 38–45, jan. 2006.