

SABRINA DE OLIVEIRA PINTO MUNIZ FERREIRA

**CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DE BIOMASSAS AGRÍCOLAS E
FLORESTAIS NO ESTADO DE PERNAMBUCO**

RECIFE
Pernambuco - Brasil
Dezembro – 2022

SABRINA DE OLIVEIRA PINTO MUNIZ FERREIRA

CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DE BIOMASSAS AGRÍCOLAS E
FLORESTAIS NO ESTADO DE PERNAMBUCO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal Rural de Pernambuco para obtenção do Título de Mestra em Ciências Florestais, Área de Concentração: Ciências Florestais, Linha de Pesquisa: Manejo Florestal e Utilização de Produtos Florestais.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Leite Braz

RECIFE
Pernambuco - Brasil
Dezembro – 2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- F383c Ferreira, Sabrina de Oliveira Pinto Muniz
Caracterização energética de biomassas agrícolas e florestais no Estado de Pernambuco / Sabrina de Oliveira Pinto Muniz Ferreira. - 2022.
81 f. : il.
- Orientadora: Rafael Leite Braz.
Inclui referências.
- Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Recife, 2023.
1. Qualidade de insumos energéticos. 2. Fontes renováveis. 3. Reaproveitamento de resíduos. 4. Sustentabilidade. 5. Bioenergia. I. Braz, Rafael Leite, orient. II. Título

CDD 634.9

SABRINA DE OLIVEIRA PINTO MUNIZ FERREIRA

**CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DE BIOMASSAS AGRÍCOLAS E
FLORESTAIS NO ESTADO DE PERNAMBUCO**

APROVADA em: 16/12/2022

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Pedro Nicó de Medeiros Neto - (UAEF /UFCG)

Profa. Dra. Raquel Marchesan - (CEF/UFT)

Orientador:

Prof. Dr. Rafael Leite Braz - (DCFL/UFRPE)

**RECIFE
Pernambuco - Brasil
Dezembro – 2022**

Dedico esta pesquisa primeiramente a Deus, que sempre foi fiel em minha vida e me colocou em lugares que jamais imaginei alcançar, principalmente quando me subestimaram, dizendo que eu seguiria um padrão e não seria ninguém e não conseguiria alcançar nada. Dedico também à minha filha Isabella de Oliveira Muniz, meu bebê arco-íris, que é por quem eu luto todos os dias para conseguir alcançar voos mais altos para proporcionar tudo que nós merecemos. Ela foi minha fonte de inspiração, força e perseverança e ao meu anjinho no céu, que está nos braços do Senhor. E por fim, à minha amiga Camilla Guinho Pires, que acreditou em mim para dar início a esta longa jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me conceder força, garra e esperança para continuar lutando para alcançar meus objetivos, apesar dos muitos obstáculos nessa caminhada. Por me mostrar que Ele me capacita para fazer coisas que jamais imaginei e alcançar o que antes, era inimaginável aos meus olhos.

À minha filha Isabella, que é uma fonte de energia para mim. Que foi gerada com muito amor nesse momento tão especial, a obtenção de mais um título. Ela me deu forças para continuar apesar dos sustos em emergências de hospitais, horas de produção perdidas de repouso, tardes de sono em que eu mal conseguia abrir os olhos para escrever, noites mal dormidas, estresse, ansiedade e medos que tive após seu nascimento. Além disso, ter que conciliar preocupações e cuidados com minha gestação, puerpério juntamente com minhas obrigações da pós-graduação sozinha sem rede de apoio foi muito difícil, mas sem ela nada disso faria sentido para mim. Ela foi meu arco-íris após dias nublados.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, o qual me proporcionou novos conhecimentos, novos desafios e abrindo meus horizontes para novas possibilidades, tudo vivido foi incrível nesse período apesar dos percalços ao longo desta jornada.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por me conceder a bolsa de estudos durante o mestrado, a qual foi de extrema importância ao longo desse período, me ajudando a me dedicar totalmente ao meu estudo.

Aos professores do programa de pós-graduação pelos conhecimentos e experiências compartilhadas, me inspirando cada dia mais e também ao meu orientador Dr. Rafael Leite Braz por todo auxílio e confiança durante o desenvolvimento desta pesquisa.

E por fim, aos professores Raquel Marchesan e Pedro Nicó de Medeiros Neto, membros da banca de qualificação e defesa do mestrado, os quais agregaram imensamente a este projeto com sua dedicação, experiência, sugestões e contribuições.

"Só quando a última árvore for derrubada, o último peixe for morto e o último rio for poluído é que o homem perceberá que não pode comer dinheiro" (Provérbio Indígena).

FERREIRA, SABRINA DE OLIVEIRA PINTO MUNIZ. **Caracterização energética de biomassas agrícolas e florestais no Estado de Pernambuco**. 2022. Orientador: Rafael Leite Braz.

RESUMO

O uso da biomassa agrícola e florestal como matéria-prima para geração de energia tem crescido no Brasil. O país possui alto potencial energético devido aos seus diversos cultivos e florestas plantadas, como por exemplo, bagaço de cana-de-açúcar e eucalipto. Além disso, há a geração de resíduos das biomassas, os quais muitas das vezes são descartados apesar de possuírem potencial energético. Sendo assim tem se intensificado a busca por alternativas sustentáveis, menos poluentes e renováveis para substituir ou reduzir o uso de recursos naturais não renováveis, além de incentivar o aproveitamento de resíduos de biomassa para fins energéticos. Os objetivos desta pesquisa foram avaliar a qualidade energética de algumas biomassas agrícolas e florestais do estado de Pernambuco, determinar suas propriedades físicas, químicas e energéticas, comparar o potencial energético das biomassas, estabelecer a melhor biomassa para uso energético, além de visar o aproveitamento dos resíduos dessas biomassas como matéria-prima para geração de energia. Para realizar este estudo, foram utilizadas cinco biomassas agrícolas e florestais de processos produtivos no estado de Pernambuco: Bagaço de cana-de-açúcar, casca de eucalipto, cavaco de eucalipto, serragem de madeira e poda da arborização urbana do município de Recife. Foram determinadas as propriedades físicas, químicas e energéticas das mesmas, quanto ao teor de umidade, densidade a granel, análise química imediata, química molecular, química elementar, poder calorífico superior, inferior e útil, densidade energética e índice de valor combustível. A partir dos resultados obtidos, as biomassas que obtiveram a melhor qualidade energética, com maior poder calorífico superior foram o bagaço de cana-de-açúcar (18.405 KJ/Kg), seguido pela serragem (18.115 KJ/Kg) e cavaco de eucalipto (18.024 KJ/Kg) e são estatisticamente semelhantes entre si. Já a que apresentou menor poder calorífico foi a casca de eucalipto (17.494 KJ/Kg). Quanto à química elementar, o teor de hidrogênio foi o único que não apresentou diferença significativa entre as biomassas. Quanto à densidade energética e ao IVC, as biomassas que apresentaram os maiores valores foi o cavaco de eucalipto (6,16 GJ/m³ e 307, respectivamente), já a serragem o segundo maior (5,91 GJ/m³ e 32,86, respectivamente). Já o resíduo de poda obteve o menor valor de densidade energética (2,63 GJ/m³) e o bagaço de cana o menor IVC (3,06). As variáveis que se mostraram imprescindíveis para estes resultados de poder calorífico foram análise química molecular, oxigênio e enxofre. Sendo assim, conclui-se a possibilidade no uso de todas as biomassas para fins energéticos, porém as biomassas com melhor qualidade energética, ou seja, que possuem melhor combustibilidade são bagaço de cana-de-açúcar, serragem e cavaco de eucalipto.

Palavras-chave: Qualidade de insumos energéticos, Fontes renováveis, Reaproveitamento de resíduos, Sustentabilidade, Bioenergia.

FERREIRA, SABRINA DE OLIVEIRA PINTO MUNIZ. **Energy characterization of agricultural and forest biomass in the State of Pernambuco.** 2022. Advisor: Rafael Leite Braz.

ABSTRACT

The use of agricultural and forestry biomass as raw material for energy generation has grown in Brazil. The country has a high energy potential due to its various crops and planted forests, such as sugarcane bagasse and eucalyptus. In addition, there is the generation of biomass residues, which are often discarded despite having energy potential. Therefore, the search for sustainable, less polluting and renewable alternatives has intensified to replace or reduce the use of non-renewable natural resources, in addition to encouraging the use of biomass residues for energy purposes. The objectives of this research were to evaluate the energetic quality of some agricultural and forestry biomasses in the state of Pernambuco, to determine their physical, chemical and energetic properties, to compare the energetic potential of the biomasses, to establish the best biomass for energy use, in addition to residues of these biomasses as raw material for energy generation. To carry out this study, five agricultural and forestry biomasses from productive processes in the state of Pernambuco were used: sugarcane bagasse, eucalyptus bark, eucalyptus chips, wood sawdust and pruning of urban trees in the municipality of Recife. Their physical, chemical and energetic properties were determined, regarding moisture content, bulk density, immediate chemical analysis, molecular chemistry, elemental chemistry, higher, lower and useful calorific value, energy density and fuel value index. From the results obtained, the biomasses that obtained the best energy quality, with the highest calorific value were sugarcane bagasse (18,405 KJ/Kg), followed by sawdust (18,115 KJ/Kg) and eucalyptus chips (18,024 KJ/Kg) and are statistically similar to each other. The one with the lowest calorific value was eucalyptus bark (17,494 KJ/Kg). As for the elemental chemistry, the hydrogen content was the only one that did not present a significant difference between the biomasses. As for energy density and CVI, the biomasses that presented the highest values were eucalyptus chips (6.16 GJ/m³ and 307, respectively), whereas sawdust had the second highest (5.91 GJ/m³ and 32.86, respectively). Pruning residue had the lowest energy density value (2.63 GJ/m³) and sugarcane bagasse had the lowest CVI (3.06). The variables that proved essential for these results of calorific value were molecular chemical analysis, oxygen and sulfur. Therefore, the possibility of using all biomass for energy purposes is concluded, but the biomass with better energy quality, that is, which have better combustibility, are sugarcane bagasse, sawdust and eucalyptus chips.

Keywords: Quality of energy inputs, Renewable sources, Reuse of waste, Sustainability, Bioenergy.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1 Matriz energética no Brasil.....	15
2.2 Uso de biomassa agrícola e florestal como fonte de energia.....	18
2.3 Características da biomassa para uso energético	20
2.4 Disponibilidade de resíduos agrícolas e florestais no Nordeste.....	24
2.5 Tipos de biomassas	26
2.5.1 Bagaço de cana-de-açúcar	26
2.5.2 Casca e cavaco de eucalipto	28
2.5.2.1 Casca de eucalipto.....	28
2.5.2.2 Cavaco de eucalipto.....	29
2.5.3 Serragem de madeira	30
2.5.4 Poda urbana (Folhas, fustes e galhos)	31
3. MATERIAL E MÉTODOS	32
3.1 Coleta do material.....	32
3.2 Local de estudo.....	33
3.3 Preparo das amostras e Análises realizadas	34
3.4 Caracterização física das biomassas.....	36
3.4.1 Teor de umidade e Densidade a granel	36
3.5 Composição química das biomassas.....	37
3.5.1 Análise química imediata: Teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo.....	37
3.5.1.1 Teor de materiais voláteis	37
3.5.1.2 Teor de cinzas.....	39
3.5.1.3 Teor de carbono fixo	40
3.5.2 Análise química molecular: Teores de extrativos, Lignina insolúvel e Holocelulose	40
3.5.2.1 Teor de extrativos totais.....	40
3.5.2.2 Teor de lignina insolúvel (Klason)	41
3.5.2.3 Teor de holocelulose.....	42
3.5.3 Análise química elementar: Teores de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre	43
3.6 Qualidade energética das biomassas	43

3.6.1 Poder calorífico superior, inferior e útil.....	43
3.6.2 Densidade energética	44
3.6.3 Índice de valor combustível.....	45
3.7 Análise estatística	45
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1 Caracterização física e química das biomassas	46
4.2 Caracterização energética das biomassas	59
4.2.1 Índice de valor combustível (IVC)	61
4.3 Análise de Componentes Principais (PCA).....	62
4.4 Características mais e menos desejáveis das biomassas em relação às análises.....	63
5. CONCLUSÕES	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil no ano de 2021.....	16
Figura 2 - Resíduo de bagaço de cana-de-açúcar.	27
Figura 3 - Casca de eucalipto.	29
Figura 4 - Cavacos de eucalipto.....	29
Figura 5 - Resíduo de Serragem de madeira.	30
Figura 6 - Resíduo de Poda.	31
Figura 7 - Plantio experimental localizado no IPA, município de Araripina – PE.....	33
Figura 8 - Localização do Recife na região Nordeste e da Região Metropolitana do Recife – PE.	34
Figura 9 - Processos de preparo das amostras para realização das análises: A= Amostras compostas das diferentes biomassas (bagaço de cana-de-açúcar; casca e cavaco de eucalipto; serragem e poda); B= Secagem das amostras na estufa; C= Trituração das amostras em moinho; D= Peneiramento das amostras; E= Pesagem das amostras.....	35
Figura 10 - Etapas do procedimento para determinação do teor de materiais voláteis. A= Amostra retida na peneira de 60 mesh; B= Cadinho na porta da mufla por 2 minutos; C= Cadinho na borda interna inferior da mufla por 3 minutos; D= Cadinho no interior da mufla fechada por 6 minutos; E= Amostra ao término da análise.....	38
Figura 11 - Procedimento para determinação do teor de cinzas. A= 1g da amostra triturada, seca e peneirada; B= Cadinho colocado dentro da mufla fechada por 6 horas; C= Amostra ao término da análise..	39
Figura 12 - Procedimento para determinação do teor de extrativos totais. A= Amostras no aparelho Soxhlet no balão de 500 ml, sendo 250 ml de uma solução etanol/hexano (1:2); B= Amostra em “banho-maria” em torno de 100°C sendo misturado a 500 ml de água destilada em um erlenmeyer de 1 L.....	41
Figura 13 - Procedimento para determinação do teor de lignina. A= Amostras contendo 25ml de ácido sulfúrico a 72% com 500ml de água destilada fervente em um erlenmeyer de 1 L, o qual foi aquecido sob refluxo suave por duas horas; B= Após decantação do material, o mesmo foi filtrado em bomba a vácuo.	42
Figura 14 - Índice de valor combustível.....	61
Figura 15 - Diagrama de ordenação dos tratamentos considerando os escores e autovetores dos componentes principais 1 e 2.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores médios do teor de umidade, densidade a granel, análise química imediata, molecular e elementar das biomassas avaliadas.	46
Tabela 2 - Valores médios das propriedades energéticas das biomassas avaliadas.	59

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Caracterização das propriedades físicas, químicas e energéticas das biomassas	35
Quadro 2 - Características mais e menos desejáveis das biomassas em relação às análises	63

1. INTRODUÇÃO

O uso da biomassa para finalidades energéticas tem crescido cada vez mais ao longo dos anos devido a diversos fatores, como agricultura, extrativismo vegetal, mineração, comércio, indústrias, por exemplo. Portanto, tem se intensificado a busca por fontes menos poluentes e renováveis para esta finalidade devido a sua alta disponibilidade e potencial energético, para que sirvam de complemento a outras fontes de energia na matriz energética brasileira.

Diante deste cenário, o Brasil atualmente possui alto potencial para utilização da biomassa agrícola e florestal, devido a suas condições edafoclimáticas, sua alta produção agrícola, sendo uma das maiores mundialmente, como por exemplo, o maior produtor de cana-de-açúcar, chegando a gerar no ano de 2021 582,3 milhões de toneladas (EPE, 2022). Para cada tonelada de cana-de-açúcar moída, é gerado em torno de 250 kg de bagaço de cana (ROMERO, 2007). Sendo assim, é a biomassa mais utilizada no Brasil, podendo ser aproveitado tanto seu bagaço, como sua palha para geração de energia. Entretanto, grande parte dos resíduos não são aproveitados, mesmo possuindo potencial para tal fim.

Assim como o Brasil é rico em culturas, também possui grandes áreas de plantio. No ano de 2021 possuía 9,93 milhões de hectares de árvores plantadas, onde 7,53 milhões de hectares é composta pelo cultivo de eucalipto e 1,93 milhões de hectares de Pinus (IBÁ, 2022).

Sendo assim, a biomassa agrícola e florestal surge como uma matéria-prima promissora para geração de energia, pois é uma fonte renovável e menos poluente quando comparada a combustíveis fósseis, os quais contribuem para a emissão de gases do efeito estufa, dentre estes: Dióxido de carbono (CO_2), Metano (CH_4), Óxido nitroso (N_2O), Clorofluorcarbonetos (CFCs), que causam diversos problemas socioambientais. Além disso, sua correta utilização auxilia no reaproveitamento de resíduos, onde os mesmos muitas vezes não são aproveitados e descartados em locais inapropriados ou queimados a céu aberto.

Dentre as fontes renováveis, a biomassa, assim como as demais fontes de energia renovável, tem ganhado destaque mundial por proporcionar energia limpa, através de desenvolvimentos tecnológicos. Tal circunstância visa reduzir a dependência das não renováveis que causam danos ao meio ambiente, como o aumento do efeito estufa (BARROS, 2017).

Diante disto, com a necessidade de diversificação energética e do cenário crescente de consumo de energia e dos recursos naturais, é preciso destacar a relevância das fontes energéticas renováveis que quando comparadas as não renováveis, causam menor impacto ao meio ambiente e cada vez mais vem ganhando maior representatividade na matriz energética.

Neste sentido, espera-se identificar e classificar os materiais quanto ao potencial energético por meio da determinação de suas propriedades físicas, químicas e energéticas. Além de corroborar com o reaproveitamento dos resíduos, conservação dos recursos florestais, e conseqüentemente, a redução dos impactos nas florestas nativas na busca de lenha, pois 30% da matriz energética do Nordeste utiliza lenha como fonte de energia e 90% dessa lenha proveniente do bioma caatinga.

Sendo assim, os objetivos desta pesquisa foram avaliar a qualidade energética de cinco biomassas de origem agrícola e florestal do estado de Pernambuco, sendo elas: Bagaço de cana-de-açúcar, casca e cavaco de eucalipto, serragem e poda, comparar o potencial energético das biomassas, estabelecer a melhor biomassa para uso energético, além de estimular o aproveitamento dos resíduos dessas biomassas como matéria-prima para geração de energia, onde muitos são descartados de forma inadequada, tem disposição final em aterro sanitário ou são dispostos em lixões a céu aberto com risco de incêndios, impactos ambientais e na saúde humana.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Matriz energética no Brasil

No Brasil existem várias fontes energéticas. Dentre estas, as principais são usinas hidrelétricas, termelétricas, eólicas, nucleares e fotovoltaicas (EPE, 2022).

Para atender à crescente demanda energética, existem diversas fontes de geração de energia, tanto renováveis, como não renováveis. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2022) os setores que mais consumiram energia elétrica no ano de 2021 foram o setor industrial (37,4%), residencial (26,4%) e comercial (15,7%), totalizando 79,5% do consumo de energia elétrica no Brasil.

No ano de 2020 devido à pandemia do COVID 19 e suas medidas de isolamento social geraram impactos negativos na energia elétrica com uma queda

no consumo final de eletricidade de 5%, porém, a classe residencial teve reflexo positivo por conta do confinamento. Quanto ao setor de transportes, no ano de 2019 ocupou o principal setor que mais consumiu energia (32,7%). No entanto, apenas no primeiro semestre de 2020 obteve uma queda de 11%, principalmente devido às restrições de circulação e redução de deslocamento para o trabalho, devido à contaminação da COVID 19 em transportes coletivos, transporte individual e de cargas (EPE, 2020).

Se tratando de oferta interna de energia elétrica, no Brasil a fonte hidrelétrica é considerada a principal na matriz energética devido à existência de grandes cursos d'água espalhados em seu território. Portanto, encontra-se no topo quando comparada às outras fontes como gás natural, derivados de petróleo, carvão, nuclear, biomassa, eólica, solar e biogás, conforme mostrado na Figura 1 (EPE, 2022).

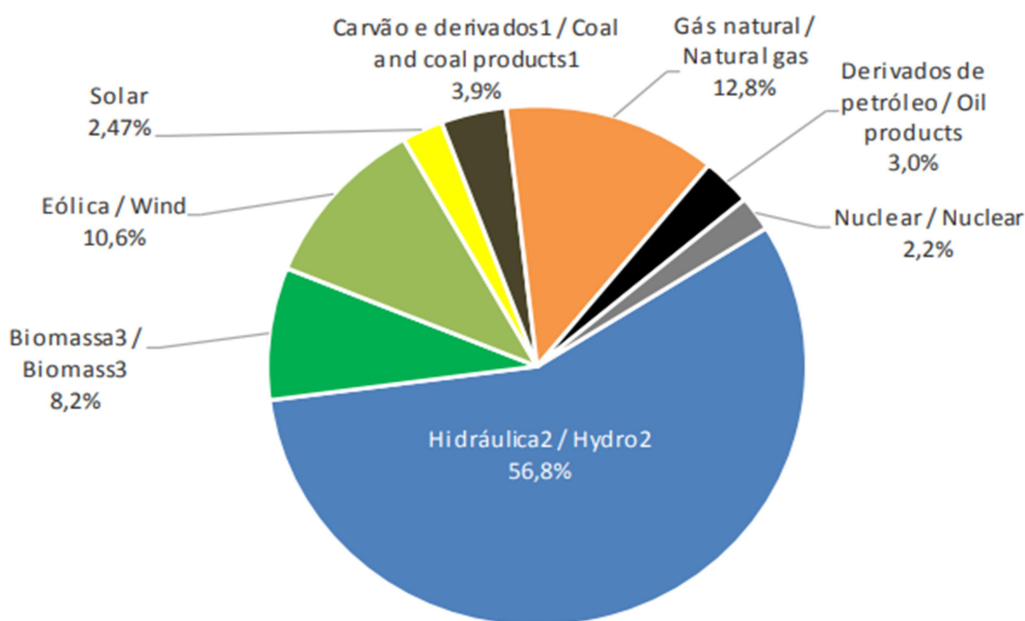


Figura 1 – Oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil no ano de 2021. **Fonte:** EPE (2022).

Dentre as fontes renováveis, temos a biomassa, que é definida de acordo com o Centro Brasileiro de Infraestrutura (CBIE, 2019), como uma fonte de energia renovável, diversificada e promissora no Brasil. O termo é aplicado para definir a massa biológica, detritos de organismos vivos ou em decomposição, de origem animal ou vegetal, empregada na produção de energia. A biomassa também pode ser definida de acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2020),

como todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica, seja de origem animal ou vegetal que pode ser utilizada na produção de energia.

Sendo assim, as fontes renováveis como a biomassa, possuem potencial de crescimento, pois elas causam menos impacto ambiental quando comparadas as não renováveis com a emissão de gases de efeito estufa, contribuindo mais com o aquecimento global. Sendo o tema de extrema importância, o maior e mais importante evento mundial sobre mudanças climáticas foi realizado em Novembro de 2022 no Egito, a COP-27 (27ª edição da Conferência das Partes), onde foi debatido diversos temas importantes como as regras do Acordo de Paris e inclusive, o uso de fontes renováveis de energia.

No Acordo de Paris 150 países se comprometeram a tentar manter a meta de 1,5 graus Celsius, porém infelizmente não houve mais nenhum acordo de redução da meta nas emissões de gases de efeito estufa e do uso de combustíveis fósseis. Diversos países se comprometeram a atingir a meta de emissões líquidas de zero carbono até 2050, o que reduziria significativamente as emissões de gases de efeito estufa (BBC NEWS BRASIL, 2022).

Dentre as fontes renováveis, apesar de a hidrelétrica ser a principal fonte na matriz energética brasileira, é relevante destacar que a utilização da Biomassa como fonte de energia tem crescido consideravelmente nas usinas termelétricas (a qual usa o calor de sua queima para gerar energia elétrica). Em suas caldeiras ocorre a substituição de combustíveis fósseis, como por exemplo, carvão mineral pela biomassa, reduzindo assim, a emissão de gases poluentes. Nos períodos de seca ocasionados pela falta de chuvas, sendo o pior momento para as usinas hidrelétricas, a biomassa se torna uma fonte de energia complementar (CBIE, 2019).

Para avaliar a capacidade e viabilidade energética de uma biomassa para geração de energia visando à substituição de uso de combustíveis fósseis, o poder calorífico é evidenciado como um dos principais parâmetros (SANTOS et al., 2011). Silva et al. (2019), observaram a utilização da biomassa como fonte energética por usinas, destacando-se os resíduos provenientes de animais e agroindustriais.

O Brasil possui grande capacidade para produção de energia a partir da biomassa, visto que possui uma potência energética em sua biodiversidade. Tais condições que o país possui, como solo fértil para plantio de biomassa, vastos territórios com incidência solar e de chuva, recursos hídricos, regiões tropicais e chuvosas que proporcionam condições favoráveis a sua produção visando finalidade

energética, portanto, tem grande potencial para se consolidar uma das lideranças energéticas no mundo (GRILO, 2019).

2.2 Uso de biomassa agrícola e florestal como fonte de energia

A biomassa pode ser utilizada de diversas formas, inclusive como fonte de geração de energia elétrica. Segundo Silva et al. (2019) pode ser classificada em duas categorias como de origem agrícola e florestal. Sua eficiência energética está diretamente ligada à sua diversificação e variação em composição.

Dentre as biomassas existentes, os produtos, subprodutos e resíduos dos recursos florestais, incluem em sua maioria a biomassa lenhosa, como por exemplo, a madeira e carvão vegetal (subproduto). As de origem agrícola, abarcando as culturas agroenergéticas, incluem os resíduos e subprodutos das atividades agrícolas e agroindustriais, como por exemplo, bagaço da cana-de-açúcar e casca de arroz (SANTOS; NASCIMENTO; ALVES, 2017).

A produção agrícola no Brasil é uma das maiores mundialmente, com altas safras que geram grande quantidade de resíduos. O resíduo de cana-de-açúcar é a biomassa mais utilizada no Brasil como insumo energético, tanto para consumo, como comercialização (SANTOS; NASCIMENTO, ALVES, 2017).

O bagaço da cana-de-açúcar é um resíduo com alto potencial energético, onde é aproveitado como combustível em termelétricas no processo de combustão, com a queima direta em fornos e caldeiras. Esse resíduo se destaca por possuir um grande aproveitamento sustentável de restos produzidos em larga escala, como a palha, o vinhoto e o bagaço (SANTOS; NASCIMENTO; ALVES, 2017). De acordo com Dantas Filho (2009) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo (USP), foi realizada uma pesquisa em 4 usinas de cana-de-açúcar autossustentáveis em Catanduva, interior de São Paulo. Nesta pesquisa toda energia consumida, deveria ser produzida pelo resíduo do bagaço de cana e o excedente vendido. Sendo assim, comprovou-se a viabilidade da utilização de todo resíduo, sendo o mesmo completamente aproveitado (MARTINS, 2009).

Segundo o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2018), a palha da cana-de-açúcar disponível na colheita mecanizada pode ser utilizada em fornos e caldeiras, podendo ser utilizada imediatamente e com baixo custo de investimento, tornando-se uma matéria-prima atrativa.

Na tentativa de mudança da realidade brasileira, as usinas termelétricas têm buscado o uso da biomassa a partir do bagaço da cana-de-açúcar, visando também reduzir o uso de gás natural, mesmo visto como fonte energética mais limpa dentre os combustíveis fósseis (EPE, 2016).

Entre os diversos tipos de biomassa utilizados, a biomassa florestal, que consiste em matérias provenientes de cultivo florestal, como por exemplo, cavaco de eucalipto e sua casca. Eles podem ser utilizados em fornalhas ou caldeiras na forma de combustão direta através de toras de madeiras utilizadas para lenha ou cavacos, podendo ser fonte energia elétrica ou térmica (FOELKEL, 2016).

Se tratando de compra de madeira para fins energéticos, no estudo de Lima (2010) reforça a importância de levar em conta os fatores que influenciam na quantidade de energia útil da biomassa, apesar da dificuldade de mensuração de todas as variáveis, de modo que o comprador pagasse apenas pela quantidade de energia útil da madeira.

Preilliper et al. (2016) comprovaram que os resíduos gerados do ano de 2007 até 2012, daria para sustentar uma usina termelétrica por aproximadamente 43 anos, tendo um retorno financeiro de R\$ 13.240.654,00, suprimindo a demanda da cidade (1.382.268 kWh) e evitando a disposição final inadequada dos resíduos sobre o meio ambiente, reforçando a ideia de que a biomassa pode servir de insumo com potencial energético em outros empreendimentos.

A biomassa residual possui grande valor energético e econômico, porém, ao invés de ter um aproveitamento, contribuindo para o meio ambiente e para a sociedade gerando emprego e renda, muitas das vezes é descartada de forma inadequada, ou seja, em locais inapropriados para o descarte de resíduos. Portanto, é de grande valia a utilização de biomassa para geração de energia tanto no setor econômico como ambiental (SANTOS et al., 2020).

De acordo com a Lei 12.305/2010, a qual institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), em seu capítulo 2, artigo 3º define e cita a importância da destinação final ambientalmente adequada dos resíduos, como a reciclagem, compostagem, aproveitamento energético. Além disso, a disposição final ambientalmente adequada, como disposição de rejeitos em aterro sanitário, visando minimizar danos ao meio ambiente e à saúde pública. Reforçando a importância do aproveitamento dos resíduos, onde a biomassa que muitas das vezes tem sua destinação final inadequada ou em aterros sanitários, tem potencial de

aproveitamento energético (BRASIL, 2010).

Alguns resíduos de biomassa utilizados na combustão por queima direta em fornos e caldeiras, que é uma forma mais simples são resíduos de serragem, galhos, cascas, bagaço de cana, poda, dentre outros, se tornando uma opção de matéria-prima energética. Apesar de ser o modo mais simples, porém possuem menor densidade, maior umidade e menor poder calorífico, portanto, a compactação é uma forma vantajosa de aumentar a densidade da biomassa e assim, seu poder calorífico (JACINTO, 2017).

A biomassa se destaca nos processos de combustão em caldeiras, gaseificadores e biodigestores, ressaltando que a biomassa pode ser utilizada não somente para a geração de energia elétrica, mas também de calor através da queima direta e produção de biocombustíveis (SILVA et al., 2019).

Quanto ao potencial energético da biomassa de poda de árvores, Souza, Alencar e Mazzonetto (2016) citam que a diferença do potencial energético de seu estudo para os de algumas literaturas, ocorre por diversos fatores, como diferentes espécies arbóreas, localização, condições climáticas e período distintos, porém afirmam que as variações são aceitáveis devido às biomassas serem distintas.

Como outra fonte de geração de energia, o biogás tem potencial de geração de energia elétrica, térmica ou mecânica a partir do aproveitamento da biomassa residual (FERNANDES, 2012). O biogás é uma fonte renovável de energia, pois é obtido a partir da digestão anaeróbica da matéria orgânica, tendo a possibilidade de ser convertido em energia térmica ou elétrica (ARAÚJO, 2017).

Silva (2018a) em seu estudo avalia que os investimentos para implantação e manutenção do biodigestor para produção de biogás a partir da biomassa de poda teria baixa eficiência para geração de energia elétrica, portanto, depende de fatores como custo de investimento e qualidade do biofertilizante produzido. Além de concluir que em seu estudo que a combustão direta teria melhor eficiência em comparação à produção de biogás.

2.3 Características da biomassa para uso energético

A Biomassa pode ser adquirida de vegetais lenhosos (madeira e seus resíduos) e não lenhosos (cana-de-açúcar), além de resíduos orgânicos (alimentos) e biofluidos (óleos vegetais). Nesse sentido, para a determinação da potencialidade

de um combustível, é necessário avaliar se este é usado dentro de sua total capacidade, sendo de extrema importância conhecer as suas características físicas, químicas e energéticas (PENTO, 2015).

Portanto, o teor umidade, densidade, análise química imediata, molecular e elementar são muito importantes para avaliar a biomassa com viabilidade energética, pois elas possuem correlação com o poder calorífico. Através de tais análises é possível verificar seu potencial e comportamento energético dos combustíveis, podendo utilizar tais informações para melhorar o aproveitamento e o uso do combustível (VALE et al., 2011).

Quanto às características físicas, dentre todas as variáveis analisadas, o teor de umidade é a propriedade física que mais varia dentro da árvore, visto que ela expressa a quantidade de água presente na biomassa em relação ao seu peso total. A determinação do TU é realizada através do método gravimétrico. Segundo Neves (2012) existe uma relação entre umidade e poder calorífico, sendo assim, é preferível que a madeira apresente baixos teores de umidade entre 10% e 13%, conforme Foelkel (2016), para que não interfira negativamente no poder calorífico.

Sendo assim, a madeira utilizada para fins energéticos pode sofrer diversas variações, as quais podem interferir em sua qualidade e em seu potencial calorífico, afetando seu rendimento energético. A umidade é a característica que mais afeta a quantidade de energia útil na madeira, em contrapartida, um dos fatores que aumentam seu potencial energético é a densidade, a qual varia conforme a idade da madeira, ou seja, quanto mais velha se obtém mais massa e conseqüentemente maior energia (LIMA, 2010).

Segundo Corradi (2021) o tempo de secagem é um fator que interfere no teor de umidade da biomassa, podendo sofrer ainda interações de fatores ambientais locais, como a umidade relativa do ar, a temperatura, a estação do ano, entre outros.

Assim como a umidade, a densidade é uma variável importante em uma biomassa, ela expressa a quantidade de massa ocupada em uma unidade de volume. Dessa forma, a densidade a granel faz a relação entre o peso da madeira e o volume conhecido. Outro ponto importante que vale ressaltar é que a densidade está diretamente ligada à lignina e ao poder calorífico da madeira, ou seja, quanto maior a densidade espera-se maior poder calorífico.

Se tratando de densidade a granel, segundo Jacinto (2017) reforça a importância da peletização com a intenção de aumentar a densidade energética de

resíduos de biomassa, pois quanto maior a densidade, maior o seu poder calorífico.

Portanto, para que uma biomassa possua alto poder calorífico, outro fator importante é avaliar suas características químicas. Na análise química imediata, os teores de materiais voláteis (TMV) que é a parte do combustível que evapora quando o mesmo é submetido a elevadas temperaturas e o teor de cinzas (TCZ) devem apresentar baixos valores, pois valores elevados prejudicam a qualidade da biomassa. Quanto ao teor de carbono fixo (TCF) - que é a fração de carbono que permanece na amostra após a combustão, é desejável alto valor, pois contribui para o aumento do poder calorífico.

A composição imediata de uma amostra é o conteúdo em porcentagem de massa de carbono fixo, voláteis, umidade e cinzas. É importante frisar que os materiais voláteis possuem um papel relevante durante a ignição e as etapas iniciais de combustão da biomassa (PENTO, 2015). Além disso, produzem fumaça durante a queima e possuem menor eficiência energética (BASSO, 2017).

A análise química imediata é extremamente importante na avaliação da qualidade da biomassa, uma vez que auxilia na compreensão do processo de queima da biomassa, permitindo entender o comportamento durante a conversão térmica. Para a produção energética, espera-se que o material possua baixo teor de cinzas e alto valor de carbono fixo, pois os mesmos estão atrelados ao poder calorífico.

Quanto ao teor de cinzas é o material residual proveniente do processo de combustão que são formadas por substâncias inorgânicas, por tanto, sempre é desejável a utilização de materiais com teores de cinzas inferiores a 2% para produtos madeireiros (ABREU, 2005). O teor de cinzas depende principalmente da quantidade de materiais voláteis, já que o teor de cinzas para produtos madeireiros dependendo da espécie geralmente é baixo.

Quanto ao carbono fixo, é preferível que as biomassas para utilização energética possuam altos teores para um padrão de queima com maior tempo de resistência, diferentemente de biomassas com menores teores (OLIVEIRA, 2010; MORAES et al., 2019). Silva et al. (2015) mencionaram que quanto maior o teor de carbono fixo menor será o teor de materiais voláteis por serem inversamente proporcionais, isso faz com que o processo de queima do material dure por mais tempo, ou seja, possuindo maior aproveitamento energético.

As ligninas são polímeros aromáticos altamente ramificados que possuem composição diferente em cada planta. É um componente da parede celular de algumas biomassas, principalmente espécies lenhosas. Na planta, a lignina proporciona elasticidade e resistência à madeira (YAMAN, 2004; KLOCK et al., 2005).

Se tratando da holocelulose, é o termo utilizado para a celulose em conjunto com outros polissacarídeos não-celulósicos da madeira, denominados hemiceluloses. Em biomassas de madeira, a maior parte constituinte é por polímeros de celulose e hemicelulose, esta combinação que é chamada holocelulose (SANTOS, 2008). A holocelulose possui correlação negativa com o poder calorífico, portanto, é desejável baixos valores no combustível.

De acordo com Jara (1989), o poder calorífico é definido como a quantidade de energia na forma de calor liberada pela combustão de uma unidade de massa da madeira. Já Machado, Voguel e Silva (2014) definem como a quantidade de calor liberada após a queima total de um combustível. Durante a combustão, parte da energia é utilizada na evaporação da água contida na madeira, fazendo com que parte da energia seja perdida, diminuindo assim o poder calorífico superior (LIMA, 2010).

Segundo Corradi (2021), poder calorífico também pode ser considerado como a eficiência energética de um combustível de forma eficaz com o mínimo de desperdício possível.

O poder calorífico ainda pode ser classificado em três formas: Poder calorífico Superior (PCS), Poder calorífico Inferior (PCI) e Poder calorífico Útil (PCU). O Poder Calorífico Superior é a energia total da madeira, no qual a água proveniente desta queima esteja em estado líquido e volume constante, sendo considerada a energia necessária para evaporar a água da umidade e água formada durante a combustão (LIMA, 2010).

Quanto ao Poder Calorífico Inferior é a energia liberada na forma de calor em uma combustão constante, onde a água encontra-se no estado gasoso, porém desconsidera a energia utilizada para evaporar a água (LIMA, 2010; CORRADI, 2021). Para efeitos práticos, o poder calorífico inferior é mais interessante, segundo Brand (2010) este se refere ao calor efetivamente possível de ser utilizado no combustível, ou seja, não considera o calor latente da vaporização da água durante o processo de combustão.

Já o Poder Calorífico Útil é a quantidade de calor útil liberado na combustão utilizado para troca térmica e geração de vapor, estando a água no estado gasoso, não sendo considerada a energia utilizada para evaporar a água da umidade da biomassa (LIMA, 2010).

2.4 Disponibilidade de resíduos agrícolas e florestais no Nordeste

A região Nordeste é privilegiada na geração de energia renovável, além do grande potencial de aproveitamento de biomassa, tanto em cultivos (eucalipto, cana-de-açúcar, soja), como em áreas nativas (Caatinga e Cerrado). A cana-de-açúcar biomassa é utilizada em diversos setores alimentício, bebidas, álcool e no setor industrial, além de fornecer subsídio para produtores da zona rural, já o bagaço é uma fonte de extrema importância no Nordeste, pois pode-se utilizar para produção de combustíveis tanto o caldo para produção de álcool, quanto como o bagaço e a palha como matéria-prima para queima direta (MMA, 2018).

Quanto à disponibilidade da biomassa de cana-de-açúcar no Nordeste, conforme dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) relata que apesar da queda de produção devido a vários fatores, como condições climáticas adversas, financeiras e mercadológicas. Os estados de Alagoas e Pernambuco continuam sendo os maiores produtores da biomassa no Nordeste, apresentando perspectivas de crescimento para a safra 2018/2019 de 16,8% e 12,8%, respectivamente. Quanto à estimativa da safra de 2021/2022 e 2022/2023, apresenta um crescimento de 19,199 mil/ton para 19,529 mil/ton em Alagoas. Já Pernambuco apresenta uma perspectiva de 12,647 mil/ton para 12,962 mil/ton (VIDAL, 2019; CONAB, 2022).

Quanto ao uso de lenha, no ano de 1974, após o aumento dos preços do Petróleo, o Brasil buscou programas com a finalidade de reduzir seus derivados e se intensificou a construção de hidroelétricas com o objetivo de reduzir os custos de importação com o Petróleo. O Nordeste teve grande impacto nos setores de indústria de cerâmica vermelha, cimento, dentre outras, as quais necessitaram utilizar praticamente lenha e carvão vegetal como fonte de energia, fato este que se intensificou no ano de 1975, o que passou a levantar a preocupação com o desmatamento (MMA, 2018).

Sendo assim, foram determinados instrumentos de controle do uso de recursos florestais de matas nativas, como cadastramento de consumidores,

exigência de elaboração de um Plano Integrado Floresta indústria para grandes consumidores e a obrigação de reposição florestal ou pagamento de taxa equivalente para médios e pequenos consumidores e substituí-los por biomassa de plantios florestais (MMA, 2018).

Diante da disponibilidade madeireira e sua aplicabilidade em Pernambuco, diversos resíduos são gerados, onde na maioria das vezes não são utilizados e são descartados ou doados, como por exemplo, em madeiras. Sendo assim, é de suma importância o aproveitamento deste resíduo para geração de energia.

Em 2021, 63,6% das empresas associadas à Iba direcionaram os seus resíduos industriais e florestais para geração de energia. Um aumento em relação ao ano anterior de 6,4 pontos percentuais (p.p.). Além da geração de energia, 17,2% dos produtores mantêm os resíduos no campo para proteção do solo contra erosão, melhoria da sua capacidade de infiltração da chuva, e melhoria da qualidade nutricional do solo, um crescimento de 4,7 p.p. em comparação a 2020. E 6,6% dos produtores escolheram outros destinos, inclusive coprocessamento (IBÁ, 2022, p.63).

Em Pernambuco, a região do Araripe fica localizada no bioma da Caatinga, é composta por municípios que correspondem a 18% do estado de Pernambuco. A região tem sofrido cada vez mais com os impactos ambientais causados principalmente pelo uso crescente de seus recursos naturais renováveis. Portanto, espécies de eucalipto também são utilizadas, tanto por indústrias usando a madeira como combustível para calcinação da gipsita e produção de gesso, como domiciliar usando a lenha e carvão vegetal, em muitos casos ilegalmente. Nesta região, localiza-se o Polo Gesseiro de Araripe, responsável pela produção de 95% do gesso do país, o qual utiliza lenha da região como fonte de energia para sua produção. (ROCHA, 2012).

Diante disso, o eucalipto tem sua importância no bioma, devido a sua característica de rápido crescimento, adaptação ao clima, rebrota, proporcionando recurso energético em menos tempo, tornando-se importante estudos sobre o reflorestamento da espécie no local a fim de reduzir os impactos ambientais, suprindo a demanda da região (ROCHA, 2012).

De acordo com pesquisa de Gama, Nascimento Júnior e Deus (2017), dados referentes ao ano de 2015 através de entrevistas realizadas mostraram que marcenarias do município de Ribeira do Pombal, na Bahia, geram em média uma estimativa de 21 m³ de resíduos de madeira (45,8% de maravalha e 38,8% de serragem), devido ao processamento mecânico da mesma, sendo o meio de destinação desses resíduos de 62% para venda, 35,5% doados e 2% para

incineração, sendo esse último causando uma direta poluição ambiental provavelmente.

Se tratando de resíduos de poda, Recife é uma cidade do estado de Pernambuco que é tida como uma das principais cidades brasileiras com área verde nas áreas urbanas, tornando esta biomassa com potencial energético para geração de energia, devido a sua alta disponibilidade.

Na cidade do Recife em Pernambuco, anualmente pode-se ter uma produção de biomassa de poda superior a 4.500 toneladas (EMLURB, 2017). Em 2006, foi implementado um programa de gerenciamento dos resíduos, a partir da prática da poda na área urbana, o qual resulta em material utilizado num processo de digestão aeróbia para produção de fertilizante que é utilizado para melhoria nutricional das áreas verdes e da arborização urbana em geral da cidade.

De acordo com o MMA (2018), através de um estudo realizado entre o ano de 2016 e 2017, o qual visou atualizar a estimativa de demanda e oferta de biomassa para energia na região Nordeste, excetuando o estado do Maranhão. Foi utilizada sua área total e produtividade média atrelada a três fatores: Fator de Acesso, Fator de Colheita Sustentável e Fator de Uso Energético. Foram objetos de estudo diversos resíduos de biomassas, entre eles: Cana-de-açúcar, serragem, lenha, bambu, óleos vegetais, dentre outros. Dentre os resíduos estudados, pôde-se constatar que a biomassa pode fornecer energia térmica através da produção de calor com baixas emissões de carbono, sendo uma matéria-prima viável para o desenvolvimento econômico sustentável no Nordeste.

2.5 Tipos de biomassas

2.5.1 Bagaço de cana-de-açúcar

Dentre as biomassas tem destaque o bagaço da cana-de-açúcar que é obtido após o processo de moagem, já a palha na colheita. Conforme Figura 2, o bagaço é um dos principais resíduos de seu processamento, possui grande disponibilidade, sendo considerado o maior resíduo da agroindústria brasileira.

Segundo EPE (2022), o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) informa que no ano de 2021 a produção de cana-de-açúcar obteve uma queda de 12%, tendo produção de 582,3 milhões de toneladas, onde apesar da

queda, é uma alta produção que gera grande quantidade de resíduos.

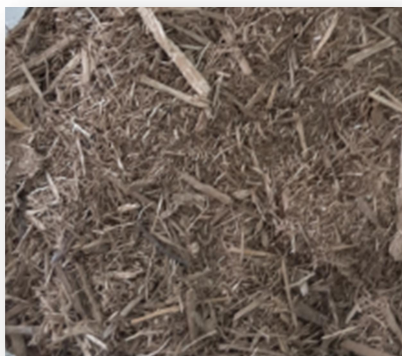


Figura 2 – Resíduo de bagaço de cana-de-açúcar. **Fonte:** Autora (2021).

Em relação ao uso energético da cana-de-açúcar, para um bom aproveitamento é necessário a retirada das impurezas vegetais (palhas) que são encontradas nas cargas da cana-de-açúcar na pós-colheita. A fim de evitar problemas, são feitos investimentos com sistema de limpeza a seco, processo responsável por separar a massa de palha da massa de cana-de-açúcar, deixando-a mais seca através de um conjunto de ventiladores. Por fim, a massa da cana segue para a moagem e posterior queima (TROMBETA, 2015; TROMBETA; FILHO, 2017).

Ainda de acordo com os autores, este tipo de investimento auxiliará bastante os empreendimentos no período de entressafra, visto que as palhas após todos os processos no período de safra são enfardadas e estocadas para uso como combustível na geração de energia elétrica, aumentando as opções de biomassa na comercialização de energia elétrica.

Grande parte deste resíduo, cerca de 60% a 90% de bagaço, por muita das vezes são utilizados pelas próprias usinas como insumo energético para aquecimento de caldeiras, o qual inicialmente era utilizado na substituição da lenha (FAPESP, 1998). Segundo Semitela (2018), o bagaço de cana-de-açúcar possui 77% de participação nas fontes de biomassa utilizadas no Brasil, sendo o resíduo mais utilizado.

Segundo CBIE (2019) nos últimos 20 anos as usinas de cana-de-açúcar investiram na biomassa utilizando o resíduo do bagaço da produção de etanol e açúcar para gerar energia, onde esta biomassa é uma fonte predominante no Brasil. O uso do bagaço para gerar energia tem ganhado mais espaço no setor sucroalcooleiro, pois com seus próprios resíduos, podendo tornar-se autossuficiente

em produção energética (SEMITELA, 2018).

A utilização do bagaço como fonte de energia proporciona vantagem e lucro em usinas, além disso, essa utilização pode gerar créditos de carbono sob as regras do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), créditos estes comercializáveis em bolsas de valores (MARTINS, 2009). Um estudo feito por Dantas Filho (2009) mostrou que uma usina com produção em torno de três milhões de toneladas de cana-de-açúcar moída gerou em torno de 740 mil toneladas de bagaço e 29 MW de energia pela queima em caldeiras.

O bagaço de cana possui em sua composição em torno de 46% de água, 50% de sólidos dissolvidos e 4% de açúcares solúveis. Para cada tonelada de cana-de-açúcar moída ocorre a geração em torno de 240 kg a 300 kg de bagaço de cana o qual é queimado nas caldeiras, e por sua vez, produz aproximadamente 6 quilos (2,4 %) de cinza. Além disso, elevadas quantidades de materiais inorgânicos que podem resultar em danos ao equipamento e aumentar a frequência de limpeza necessária para sistemas. (ROMERO, 2007; DIAS et al., 2012).

2.5.2 Casca e cavaco de eucalipto

2.5.2.1 Casca de eucalipto

Entre as maiores fontes de biomassa vegetais disponíveis, está a casca das árvores, especialmente a casca de *Eucalyptus*. Segundo o Relatório Anual do IBÁ (2022), referente ao ano de 2021, a área total de floresta plantada no Brasil foi de 9,93 milhões de hectares, sendo os estados de Minas Gerais, São Paulo e Paraná, Mato Grosso do Sul, Santa Catarina e Rio Grande do Sul são os principais produtores de florestas plantadas no Brasil. Dentre elas a espécie do gênero eucalipto corresponde a um total de 7,53 milhões de hectares, os estados com maior predominância da espécie são Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e São Paulo.

A espécie possui utilização para diversas finalidades tanto para uso energético (briquete, carvão, lenha,), como para fins madeireiros (movelaria, painéis, compensados) e na produção de celulose e papel. Também tem crescido no setor siderúrgico, sendo utilizado como carvão em fornos industriais e comerciais (padarias, churrascarias e pizzarias) para fins energéticos.

A casca de eucalipto, conforme mostra na Figura 3, pode ser utilizada como combustível em caldeiras para geração de vapor (FOELKEL, 2016). Esta biomassa

só tem vantagem como combustível quando utilizada em grande quantidade para favorecer a combustão (JUIZO; LIMA; SILVA, 2017).



Figura 3 – Casca de eucalipto. **Fonte:** Autora (2021).

2.5.2.2 Cavaco de eucalipto

O eucalipto é a espécie exótica mais plantada no Brasil, principalmente para fins de produção de papel e celulose, porém, atualmente o mesmo vem sendo utilizado quando o objetivo é a produção energética. No Rio Grande do Norte sua madeira é bastante utilizada para produção de energia, possuindo grande potencial devido às suas características (FERREIRA et al., 2017). Os indivíduos dessa espécie têm em geral uma alta produção de madeira, possuindo uma média nacional de 41 m³ por hectare, com ciclos de corte de aproximadamente sete anos (EMBRAPA, 2014; MMA, 2018).

Conforme figura 4, uma opção é transformar a madeira em cavacos, onde em processos de combustão direta em caldeiras e fornos apresentam melhor eficiência energética devido a maior área de contato.



Figura 4 – Cavacos de eucalipto. **Fonte:** Autora (2021).

2.5.3 Serragem de madeira

Outro resíduo com potencial energético é a serragem, conforme Figura 5, que também chamado de pó de serra, é um resíduo sólido obtido através de passagem da lâmina de serra durante o corte da madeira. Ela é formada por minúsculas partículas de madeira cujo volume é significativo (CABREIRA, 2011).



Figura 5 – Resíduo de Serragem de madeira. **Fonte:** Autora (2021).

Os resíduos de serragem de madeira, como outras opções de biomassa podem ser utilizados em diversos setores como combustíveis de caldeiras em padarias, hospitais, para uso doméstico, indústrias de tijolos, cerâmica, dentre outros, além de haver a possibilidade de utilização como fonte de energia na própria carpintaria de geração (RAPOSO et al., 2015).

Geralmente esse resíduo é visto como poluente ao meio ambiente e seu interesse comercial é baixo. Dos 88,9% dos plantios de Pinus estão concentrados na região Sul, sendo Paraná e Santa Catarina os principais produtores.

No estudo de Liza et al. (2017) com análise da qualidade da biomassa de serragem de madeira, foi destacado que a mistura de resíduos de materiais recentes com antigos, uniformizam os parâmetros de qualidade do combustível, sendo uma alternativa para melhorar a combustão do material. Uma estratégia para biomassa ser utilizada para fins energéticos é o adensamento ou a compactação da biomassa, o que impacta no aumento do potencial energético da biomassa, aumentando a densidade energética do material em comparação ao combustível in natura (MORAES et.al., 2019).

2.5.4 Poda urbana (Folhas, fustes e galhos)

Resíduos sólidos de poda, conforme Figura 6 são aqueles obtidos através da manutenção realizada em árvores no meio urbano, essa manutenção pode ser o corte total da árvore ou o desgalhamento das mesmas. Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) Norma Brasileira NBR 10004 (2004), os resíduos de poda podem ser classificados como resíduos sólidos de classe II, ou seja, são aqueles considerados não perigosos, segundo os impactos e riscos que podem causar. Segundo a Norma, os mesmos apresentam potencial energético, porém muitas das vezes são destinados a aterros sanitários e em alguns casos à compostagem.

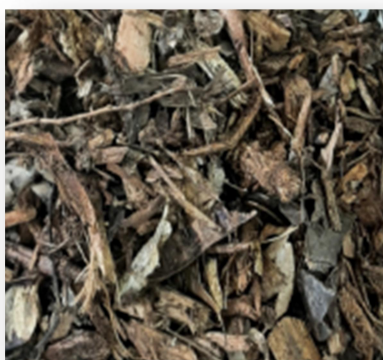


Figura 6 – Resíduo de Poda. **Fonte:** Autora (2021).

Apesar dos resíduos de poda ser classificado como resíduos não perigosos, sabe-se que a disposição inadequada deste resíduo em locais a céu aberto, como lixões ou aterros sanitários pode provocar uma série de problemas ambientais, além de problemas na saúde, como doenças negligenciadas. Este fato ainda é existente no Brasil devido à alta geração, não reaproveitamento e modelo insustentável no gerenciamento de resíduos, os quais possuem potencial de reaproveitamento. Entretanto, a utilização da biomassa como fonte energética surge como uma solução para tal problemática (FERREIRA et al., 2018; FERREIRA; FERREIRA JÚNIOR; LYRA, 2019).

Além disso, sua disposição inadequada em lixões e aterros geram gases de efeito estufa a partir de sua oxidação, portanto, utilizar resíduos de poda com finalidade energética são uma ótima alternativa, principalmente em períodos de crise hídrica e energética (SOUZA; ALENCAR; MAZZONETO, 2016).

Em um estudo feito por Souza, Alencar e Mazzonetto sobre o potencial energético de resíduos de poda de árvores do município de Piracicaba – SP, concluiu-se que dependendo da utilização, a poda de árvore possui potencial energético que poderia gerar em média R\$ 285.000,00 por ano considerando os dados do ano de 2016 e R\$ 665.000,00 no ano de 2014 durante a crise energética.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Coleta do material

O estudo foi realizado com biomassas provenientes dos processos produtivos dos setores agrícola e florestal no estado de Pernambuco.

As biomassas estudadas foram:

1- Resíduo de bagaço de cana-de-açúcar: biomassa coletada em uma usina de cana-de-açúcar da região metropolitana do Recife. A cana-de-açúcar é empregada no setor sucroalcooleiro, sendo o bagaço obtido após o processo de moagem para extração do caldo, gerando ao final do processo o bagaço com menor grau de umidade;

2- Casca de clones de *Eucalyptus* spp.: biomassa dos clones de *Eucalyptus* spp. Provenientes de árvores do plantio florestal no Polo Gesseiro de Araripe-PE com idades de 7 e 8 anos;

3- Cavaco de clones de *Eucalyptus* spp: biomassa dos clones de *Eucalyptus* spp. provenientes de árvores do plantio florestal no Polo Gesseiro de Araripe-PE com idades de 7 e 8 anos;

4- Resíduo de serragem: biomassa coletada em uma madeireira localizada na região metropolitana de Recife-PE, obtidas por meio do processamento mecânico da madeira das espécies *Pinus* sp., *Hymenaea courbaril* (Jatobá) e *Manilkara bidentata* (Maçaranduba), bastante utilizadas no setor de construção civil na Região Metropolitana do Recife, e;

5- Resíduos de poda urbana (galhos, fustes e folhas): biomassa obtida a partir da poda da arborização urbana de Recife, junto à Empresa de Limpeza Urbana da Prefeitura da Cidade do Recife (EMLURB/PCR), sendo as espécies com maiores ocorrências: *Pithecellobium Dulce* (Acácia mimosa), *Terminalia Catappa* (Amendoeira), *Ficus* spp., *Leucaena Leucocephala*, *Licania Tomentosa* (Oitizeiro) e *Clitoria Fairchildiana* (Sombreiro).

3.2 Local de estudo

A pesquisa foi desenvolvida com a biomassa da casca e o cavaco de *Eucalyptus* spp. provenientes de árvores do plantio do Polo Gesseiro de Araripe, na Estação Experimental do Araripe do Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA), localizado na Chapada do Araripe, município de Araripina – PE.

O município de Araripina localiza-se no Sertão e na Microrregião de Araripina, no Estado de Pernambuco, possui uma região de 2.037,394 km², população estimada de 85.301 e densidade demográfica de 40,84 hab/km². Sua sede se encontra a 683,2 km da capital, possuindo 622 metros de altitude com coordenadas geográficas de 07°34'34" S e 40°29'54" W, conforme Figura 7. O clima é do tipo Tropical Semiárido, com chuvas de verão. O período chuvoso se inicia em novembro com término em abril (BELTRÃO et al., 2005; IBGE, 2021a).

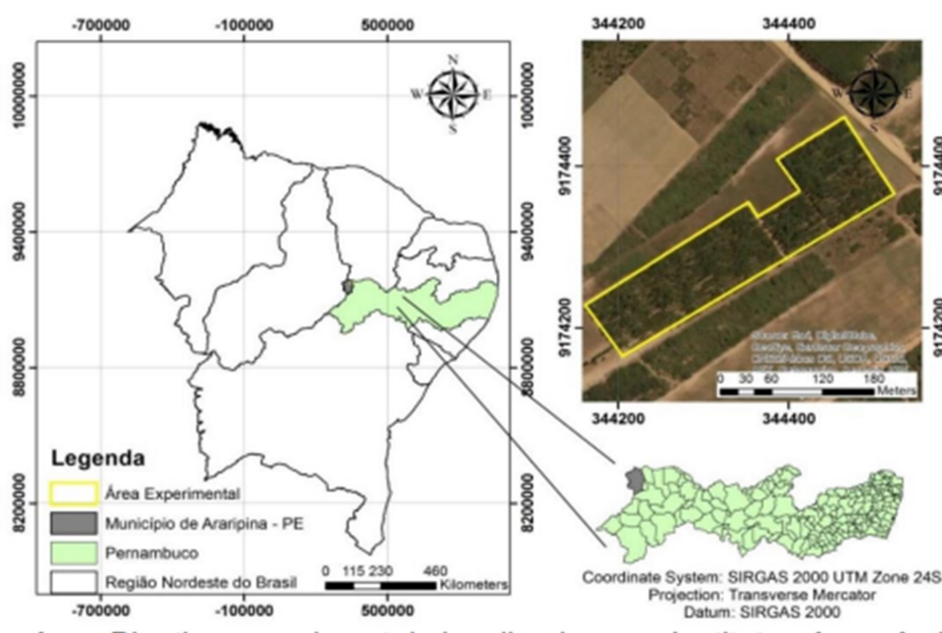


Figura 7 – Plantio experimental localizado no IPA, município de Araripina – PE. **Fonte:** Araújo (2019).

Quanto aos resíduos de bagaço de cana-de-açúcar, serragem e poda urbana, são provenientes da Região Metropolitana do Recife, localizada na Região Nordeste, Mesorregião do Estado de Pernambuco – PE. A cidade possui uma área territorial de 218,843 km², população estimada de 1.661.017, densidade demográfica de 7.039,64 hab/km², está localizada na posição central no litoral do nordeste do Brasil, situando-se na área central da Região Metropolitana do Recife, a 800 km das

metrópoles regionais de Salvador e Fortaleza. Possui seus limites ao norte com os municípios de Olinda e Paulista, ao sul, Jaboatão dos Guararapes, ao leste com o oceano Atlântico e ao oeste com São Lourenço da Mata e Camaragibe, conforme Figura 8 (IBGE, 2021b; PREFEITURA MUNICIPAL DE RECIFE, 2023).

Suas coordenadas geográficas são latitude 8° 04' 03" s e longitude 34° 55' 00" w. Possui clima tropical-úmido e situa-se 4 metros acima do mar. (PREFEITURA MUNICIPAL DE RECIFE, 2023).



Figura 8 – Localização do Recife na região Nordeste e da Região Metropolitana do Recife – PE. **Fonte:** Prefeitura Municipal de Recife (2023).

De cada classe de biomassa foi realizada uma amostragem do tipo composta, misturada de forma homogênea para obtenção de 3 amostras representativas para a determinação das variáveis estudadas. Após a coleta foram levados para realização das análises no Laboratório de Tecnologia e Anatomia da Madeira da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) – Campus Recife, sendo acondicionados até a avaliação das propriedades físicas, químicas e energéticas (ABNT NBR 10007, 2004).

3.3 Preparo das amostras e Análises realizadas

Após a coleta parte dos materiais foram acondicionados e secos na estufa a 103°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) por 24 horas. Em seguida foram triturados em um moinho tipo Willey

modelo Tecnal TE 650 para redução das partículas dos materiais. Posteriormente peneiradas utilizando peneiras de tamanhos específicos de acordo com suas respectivas análises de 40 a 200 mesh, conforme detalhado nas metodologias. As mesmas também foram pesadas e armazenadas em potes hermeticamente fechados para as análises químicas e energéticas, conforme figura 9.

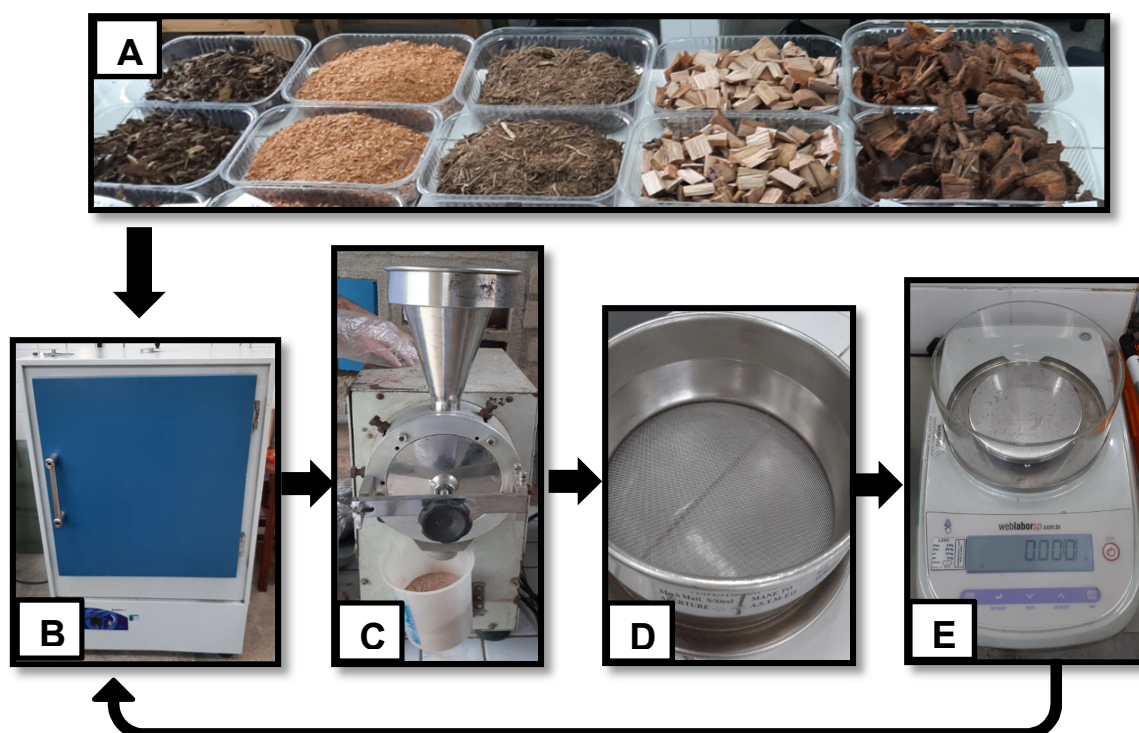


Figura 9 – Processos de preparo das amostras para realização das análises: A= Amostras compostas das diferentes biomassas (bagaço de cana-de-açúcar; casca e cavaco de eucalipto; serragem e poda); B= Secagem das amostras na estufa; C= Trituração das amostras em moinho; D= Peneiramento das amostras; E= Pesagem das amostras. **Fonte:** Autora (2021).

No Quadro 1 é possível observar as análises realizadas com suas devidas normas para cada biomassa estudada:

Quadro 1 – Caracterização das propriedades físicas, químicas e energéticas das biomassas.

	Análises	Normas
Caracterização física das biomassas	Teor de umidade	ABNT NBR 14929/2017
	Densidade a granel	ABNT NBR 6922/1981

	Análises	Normas
Análise Química Imediata	Teor de Materiais Voláteis	ASTM D-1762/84 (2013)
	Teor de Cinzas	
	Teor de Carbono Fixo	
Análise Química Molecular	Teor de Extrativos Totais	TAPPI (T 222 om-02), TAPPI (T 264 cm-97) adaptada (etanol/hexano), Bezerra Neto e Barreto (2011) e Klock et al. (2013)
	Teor de Lignina insolúvel (Klason)	
	Teor de Holocelulose	
Análise Química Elementar	Teor de Carbono	ASTM D-3176 (2015)
	Teor de Hidrogênio	
	Teor de Oxigênio	
	Teor de Nitrogênio	
	Teor de Enxofre	
Qualidade energética das biomassas	Poder calorífico Superior, inferior e útil	ASTM E-711 (1987), ISO 1928 (2009) e Parikh, Channiwala e Ghosal (2005)
	Densidade energética	OLIVEIRA et al. (2017)
	IVC	Purohit e Nautiyal (1987)

Fonte: Autora (2022).

3.4 Caracterização física das biomassas

3.4.1 Teor de umidade e Densidade a granel

As propriedades físicas dos resíduos, teor de umidade e densidade a granel foram determinadas após a secagem do material ao ar livre, até atingirem a umidade de equilíbrio.

Foram determinados teores de umidade das biomassas pelo método gravimétrico por meio da ABNT NBR 14929 (2017), a partir da determinação do peso úmido, e em seguida as amostras foram secas em estufa a 103°C (±2°C), até atingirem peso constante. O teor de umidade foi determinado pela avaliação da base úmida, pela diferença entre os pesos da amostra, antes e logo após ser submetida à secagem por meio da seguinte equação 1:

$$TU = \frac{(Mu - Ms)}{Mu} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

TU = Teor de umidade (%)

Mu = Massa úmida após secagem ao ar livre (g)

Ms = Massa seca a 103°C (g)

A densidade a granel foi determinada por meio da ABNT NBR 6922 (1981). Para tal, as amostras foram pesadas em um recipiente com dimensões conhecidas, obtendo a densidade pela relação entre a massa e volume, ambas na condição seca ao ar livre, conforme equação 2:

$$DG = \frac{M}{Vol} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

DG = Densidade a granel (Kg/m³)

M = Massa (kg)

Vol = Volume (m³)

3.5 Composição química das biomassas

3.5.1 Análise química imediata: Teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo

A análise de composição química imediata foi obtida a partir amostras moídas e peneiradas conforme preconizado pela norma da American Society for Testing and Materials D-1762/84 (ASTM, 2013), determinando os teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo.

3.5.1.1 Teor de materiais voláteis

Para a determinação do teor de materiais voláteis, as amostras foram trituradas com o auxílio de um moinho e classificadas através de peneiras de 40 mesh e 60 mesh, foi utilizado o material que ficou retido na peneira de 60 mesh. Em seguida foi pesado aproximadamente 1g da amostra isenta de umidade.

Em seguida, a amostra foi depositada em um cadinho previamente seco, com peso conhecido e tarado na balança. O cadinho foi tampado e colocado na porta da mufla por 2 minutos, previamente aquecida a 950°C (± 10°C). Passados esses 2

minutos o cadinho foi colocado na borda interna interior da mufla onde permaneceu por mais 3 minutos, e por fim o mesmo foi colocado no interior da mufla que foi fechada, onde permaneceu por 6 minutos. Após a queima, o cadinho foi retirado, colocado no dessecador até esfriar e pesado para a obtenção do teor de materiais voláteis de acordo com a equação 3 apresentada abaixo. Foram realizadas 3 repetições para cada amostra, conforme processo mostrado na Figura 10.

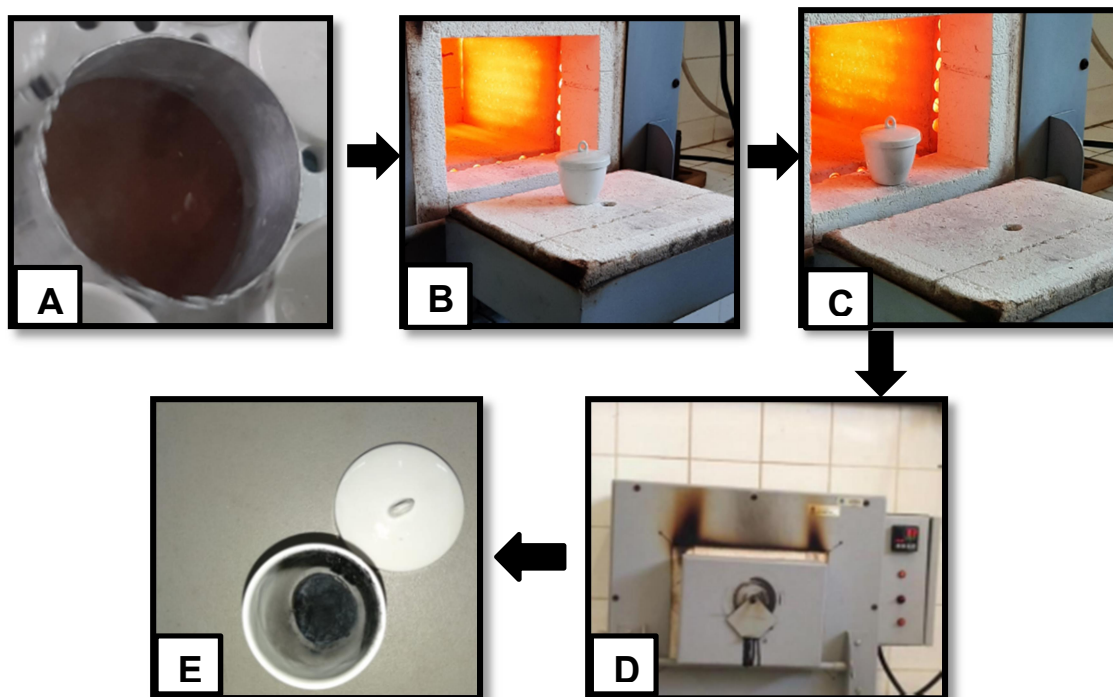


Figura 10 – Etapas do procedimento para determinação do teor de materiais voláteis. A= Amostra retida na peneira de 60 mesh; B= Cadinho na porta da mufla por 2 minutos; C= Cadinho na borda interna inferior da mufla por 3 minutos; D= Cadinho no interior da mufla fechada por 6 minutos; E= Amostra ao término da análise. **Fonte:** Autora (2021).

A porcentagem do Teor de materiais voláteis foi obtida conforme equação 3:

$$TMV = \frac{(m_2 - m_3)}{m} \times 100 \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

TMV = Teor de Materiais Voláteis (%)

m₂ = Massa inicial do cadinho + amostra (g)

m₃ = Massa final do cadinho + amostra (g)

m = Massa da amostra (g)

3.5.1.2 Teor de cinzas

Conforme processo apresentado na Figura 11, para a determinação do teor de cinzas, as amostras foram trituradas com o auxílio de um moinho e classificadas através de uma peneira de 100 mesh, utilizando o material que passou pela peneira. Em seguida foi pesado aproximadamente 1g da amostra isenta de umidade.

A amostra foi depositada em cadinho de porcelana previamente seco e com peso conhecido, onde o mesmo foi colocado dentro da mufla fechada, previamente aquecida a 750°C ($\pm 10^\circ\text{C}$). O cadinho permaneceu dentro da mufla fechada até que a biomassa queimasse completamente, aproximadamente 6 horas. Após a queima, o cadinho foi retirado, colocado no dessecador até esfriar e após isto, pesado para obter o teor de cinzas. Foram realizadas 3 repetições para cada amostra.

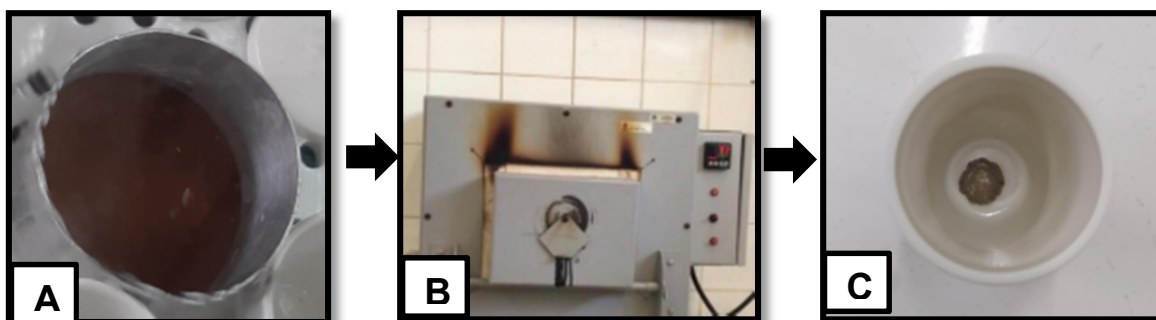


Figura 11 – Procedimento para determinação do teor de cinzas. A= 1g da amostra triturada, seca e peneirada; B= Cadinho colocado dentro da mufla fechada por 6 horas; C= Amostra ao término da análise. **Fonte:** Autora (2021).

As cinzas obtidas foram pesadas e o teor das mesmas foi determinado pela equação 4:

$$TCZ = \frac{(m1-m0)}{m} \times 100 \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

TCZ = Teor de Cinzas (%)

m1 = Massa do cadinho + amostra (g)

m0 = Massa do cadinho (g)

m = Massa da amostra (g)

3.5.1.3 Teor de carbono fixo

Com a obtenção dos valores de materiais voláteis e cinzas, o teor de carbono foi determinado pela equação 5:

$$TCF = 100 - (TCZ + TMV) \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

TCF = teor de carbono fixo (%)

TCZ = teor de cinzas (%)

TMV = teor de materiais voláteis (%)

3.5.2 Análise química molecular: Teores de extrativos, Lignina insolúvel e Holocelulose

Para determinação da composição química molecular (extrativos totais, lignina e holocelulose) foi utilizado o material previamente triturado que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retido na peneira de 60 mesh. Os procedimentos foram realizados conforme TAPPI (T 222 om-02), TAPPI (T 264 cm-97) adaptada (etanol/hexano), Bezerra Neto e Barreto (2011) e Klock et al. (2013).

3.5.2.1 Teor de extrativos totais

Conforme demonstrado na Figura 12 para a determinação de extrativos totais foram pesados 2g das amostras trituradas, secas e peneiradas que foram colocadas em cartucho de celulose e após isto, levados ao aparelho Soxhlet por um período de 6 horas contendo no balão de 500 ml, sendo 250 ml de uma solução etanol/hexano (1:2).

Em seguida, o solvente foi recuperado e o material foi levado à estufa para secagem do solvente residual por 48hs. Após seco retornou ao aparelho Soxhlet também em um cartucho de celulose por um período de 4 horas, tendo como solvente no balão de 500 ml, 250 ml de etanol a 95%. Ao final do processo, o solvente foi recuperado e as amostras levadas à estufa para secagem do solvente residual por mais 48hs.

Após esta etapa, o material foi colocado em “banho-maria” em 100°C por 1 hora sendo misturado a 500 ml de água destilada em um erlenmeyer de 1 L.

Ao término do processo as amostras foram filtradas em cadinhos filtrantes (previamente secos e tarados) e retornaram à estufa por 24 horas. Passado o período as amostras foram resfriadas e posteriormente pesadas.

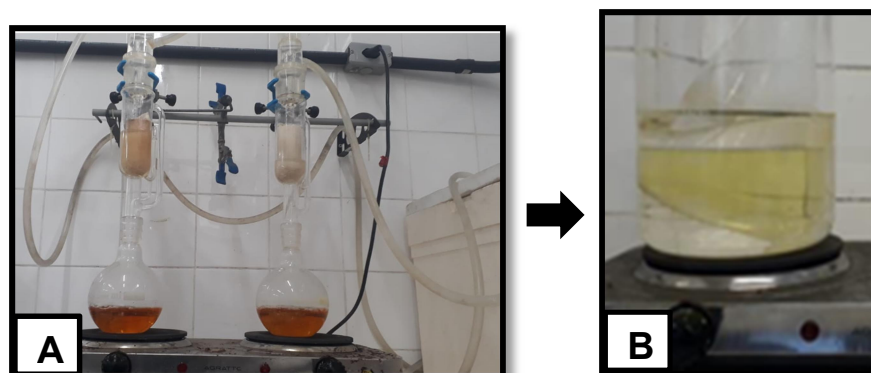


Figura 12 – Procedimento para determinação do teor de extrativos totais. A= Amostras no aparelho Soxhlet no balão de 500 ml, sendo 250 ml de uma solução etanol/hexano (1:2); B= Amostra em “banho-maria” em torno de 100°C sendo misturado a 500 ml de água destilada em um erlenmeyer de 1 L. **Fonte:** Autora (2021).

Em seguida, foi obtido o teor de extrativos totais a partir da equação 6:

$$TET = \frac{PAS - (PAC - PC)}{PAS} * 100 \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

TET: Teor de Extrativos Totais (%)

PAS: Peso da amostra seca (g)

PAC: Peso da amostra + cadinho (g)

PC: Peso do cadinho filtrante (g)

3.5.2.2 Teor de lignina insolúvel (Klason)

Conforme Figura 13, para determinação do teor de lignina insolúvel foi adicionado no béquer 25ml de ácido sulfúrico a 19°C ($\pm 2^\circ\text{C}$). Foram pesados 2g das amostras livre de extrativos e previamente secas em estufa, as quais foram transportadas para um béquer de 100 ml e adicionado 25 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4) a 72%. Em seguida, o béquer foi colocado em “banho maria” em 19°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) por um período de uma hora e meia.

Passado o período, o conteúdo do béquer foi transferido junto a 500 ml de água destilada fervente para um erlenmeyer de 1 L, o qual foi aquecido sob refluxo

suave por duas horas. Após isto, o erlenmeyer foi retirado da ebulição e permaneceu em repouso até que seu conteúdo sólido fosse decantado. Para só então ser filtrado em bomba a vácuo, onde o mesmo foi levado à estufa por 48 horas a 110°C (±2°C).

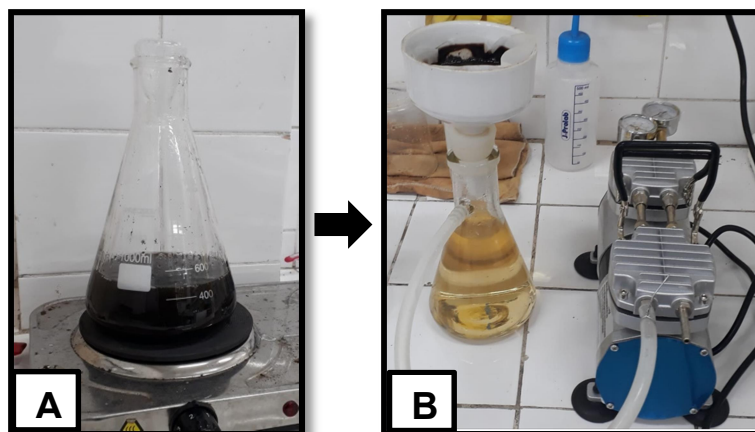


Figura 13 – Procedimento para determinação do teor de lignina. A= Amostras contendo 25ml de ácido sulfúrico a 72% com 500ml de água destilada fervente em um erlenmeyer de 1 L, o qual foi aquecido sob refluxo suave por duas horas; B= Após decantação do material, o mesmo foi filtrado em bomba a vácuo. **Fonte:** Autora (2021).

Em seguida, o cadinho foi pesado e obteve-se o teor de lignina insolúvel pela equação 7:

$$TL = ((PAC - PC) \times 100) / PA \quad (\text{Equação 7})$$

Onde:

TL = Teor de Lignina (%)

PAC = Peso da amostra + cadinho (g)

PC = Peso do cadinho filtrante (g)

PA = Peso da Amostra (g)

3.5.2.3 Teor de holocelulose

O teor de holocelulose foi obtido por diferença dos teores de extrativos totais e lignina insolúvel, por meio da equação 8:

$$THC = 100 - (TET + TL + TCZ) \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

THC = Teor de Holocelulose (%)

TET = Teor de extrativos totais (%)

TL = Teor de Lignina (%)

TCZ = Teor de cinzas (%)

3.5.3 Análise química elementar: Teores de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre

Para a obtenção da análise química elementar foi utilizada a Norma ASTM D-3176 (2015) Após secagem dos materiais em estufa por 24 horas foi realizada a trituração. Cada material triturado foi seco à temperatura de 103°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) até atingirem peso constante (Aproximadamente 48hs) e peneirado, onde utilizou-se a fração de biomassa que passou na peneira de 200 mesh, sendo utilizado 2 mg de amostra para realização desta análise.

A composição elementar das biomassas estudadas foi determinada por um analisador automático elementar modelo Vario Micro Cube. O mesmo utiliza durante a análise o hélio como gás de arraste e o oxigênio para ignição, para obtenção do teor de carbono (TC%), hidrogênio (TH%), nitrogênio (TN%) e enxofre (TS%) (NEVES et al., 2011; PAULA et al., 2011; PROTÁSIO et al., 2011a; REIS et al., 2012; LOPES, 2017). O teor de oxigênio (TO%) foi obtido a partir da diferença dos componentes, por meio da equação 9:

$$TO = 100 - (TC + TH + TN + TS + TCZ) \quad (\text{Equação 9})$$

Onde:

TO = Teor de oxigênio (%)

TC = Teor de carbono (%)

TH = Teor de hidrogênio (%)

TN = Teor de Nitrogênio (%)

TS = Teor de enxofre (%)

TCZ = Teor de cinzas (%)

3.6 Qualidade energética das biomassas

3.6.1 Poder calorífico superior, inferior e útil

O poder calorífico superior (PCS) foi determinado por uma bomba calorimétrica adiabática sob condições específicas com base na metodologia da norma ASTM E-711 (1987) e ISO 1928 (2009) para obtenção do poder calorífico

bruto, onde a água contida na biomassa permanece em estado líquido e seu cálculo é feito a partir da observação da temperatura antes e após a combustão.

Pesou-se as amostras em balança analítica com precisão de $\pm 0,1$ mg, utilizando 1g da biomassa que passou na peneira de 200 mesh, além de realizar a secagem das mesmas em estufa com temperatura de $103 (\pm 2^\circ\text{C})$, por 3 horas.

O Poder Calorífico Inferior e Útil foram obtidos por meio das equações 10 e 11 propostas por Parikh, Channiwala e Ghosal (2005):

$$PCI \text{ (KJ/Kg)} = PCS - (600 \times 0,09 \times TH) \quad (\text{Equação 10})$$

$$PCU \text{ (KJ/Kg)} = (PCI \times (1 - (0,01 \times TU))) - (600 \times 0,01 \times TU) \quad (\text{Equação 11})$$

Onde:

PCS = Poder Calorífico Superior (KJ/Kg)

PCI = Poder Calorífico Inferior (KJ/Kg)

PCU = Poder Calorífico Útil (KJ/Kg)

TU = Teor de Umidade (%)

TH = Teor de Hidrogênio (%)

3.6.2 Densidade energética

A densidade energética que é a energia contida por unidade de volume de um material, é um dos principais parâmetros para avaliação do potencial energético de uma biomassa, interferindo em sua qualidade e estando ligada à sua composição.

A mesma foi obtida pelo produto da densidade a granel e poder calorífico superior, conforme a equação 12 (OLIVEIRA et al., 2017):

$$DE = DG \times PCS \quad (\text{Equação 12})$$

Onde:

DE = Densidade energética (GJ/m³)

DG = Densidade a granel (Kg/m³)

PCS = Poder calorífico Superior (KJ/Kg)

3.6.3 Índice de valor combustível

O índice de valor combustível (IVC) foi determinado conforme Purohit e Nautiyal (1987), adaptado utilizando a densidade a granel. Neste sentido, quanto maior o índice, melhor o valor do combustível. O IVC foi obtido conforme equação 13:

$$IVC = \frac{(PCS \times DG)}{(TCZ \times TU)} \quad (\text{Equação 13})$$

Onde:

IVC = Índice de Valor Combustível

PCS = Poder Calorífico Superior (KJ/Kg)

DG = Densidade a Granel (Kg/m³)

TCZ = Teor de Cinzas (%)

TU = Teor de Umidade (%)

3.7 Análise estatística

O delineamento adotado na pesquisa foi o inteiramente casualizado com cinco tratamentos: bagaço de cana-de-açúcar, casca e cavacos de eucalipto, serragem e poda (folhas, fustes, galhos), sendo realizadas três repetições para cada análise, considerando o tipo de biomassa como fator de variação.

Em seguida, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e quando assumidas diferenças, os tratamentos foram comparados pelo teste de média de Tukey, a 95% de probabilidade. As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do software Rbio.

Foi realizada a Análise dos Componentes Principais (PCA) com o auxílio do software Past. Ela auxilia e facilita a compreensão dos dados através da conversão de um conjunto de variáveis originais em outro conjunto menor de componentes principais com informações evidenciadas e separadas para melhor interpretação dos dados através de um método matemático.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização física e química das biomassas

De acordo com os resultados obtidos por meio das análises de variâncias (ANOVA) realizadas, as variáveis dos teores de umidade, densidade a granel, análise química imediata e química molecular obtiveram diferença significativa a 95% de probabilidade pelo teste de Tukey entre as biomassas, evidenciando diferença na composição do material.

Verificou-se que o bagaço de cana apresentou os maiores valores tanto para o teor de extrativos totais (24,90%), quanto para o teor de lignina (27,31%) e menor teor de holocelulose (32,22%). O cavaco de eucalipto apresentou menor teor de extrativos totais (7,58%) e maior teor de holocelulose (72,55%), já a serragem apresentou o menor teor de lignina insolúvel (16,58%).

Quanto à análise química elementar, observa-se que todas as variáveis com exceção do teor de hidrogênio (H), apresentam diferença significativa entre as biomassas. Quanto ao teor de carbono (C), a casca de eucalipto foi a única biomassa que apresentou diferença estatística em relação às demais, onde a mesma obteve o menor valor. Foi observado que não houve diferença significativa para o teor de hidrogênio (H), portanto, não foi realizado o teste de Tukey para esta variável.

Observam-se na Tabela 1 os valores médios para o teor de umidade, densidade a granel, análise química imediata, química molecular e química elementar das biomassas.

Tabela 1 – Valores médios do teor de umidade, densidade a granel, análise química imediata, molecular e elementar das biomassas avaliadas

Tratamentos	Bagaço de Cana	Casca de Eucalipto	Cavaco de Eucalipto	Serragem	Poda
TU (%)	13,23 ab (0,32) (2,46)*	15,46 a (1,86)(12,02)	11,97 b (0,04) (0,37)	11,64 b (0,10) (0,88)	12,12 b (0,65) (5,35)
DG (Kg/m³)	143 c (9,49) (6,62)	192 b (4,38) (2,28)	342 a (1,16) (0,34)	326 a (20,74)(6,36)	148 c (28,10)(19,01)
TMV (%)	72,03 d (0,72) (1,00)	74,09 c (0,31) (0,42)	82,75 a (0,84) (1,01)	76,23 b (0,31) (0,40)	69,70 e (0,84) (1,20)
TCZ (%)	15,56 a (0,44) (2,83)	5,28 c (0,20) (3,77)	0,40 e (0,00) (0,17)	3,69 d (0,52) (14,18)	12,06 b (0,61) (5,11)

Tratamentos	Bagaço de Cana	Casca de Eucalipto	Cavaco de Eucalipto	Serragem	Poda
TCF (%)	12,41 d (1,09) (8,79)	20,63 a (0,48) (2,34)	16,85 c (0,84) (4,97)	20,09 ab (0,23) (1,17)	18,24 bc (0,88) (4,83)
TET (%)	24,90 a (1,92) (7,72)	13,97 b (0,68) (4,89)	7,58 c (2,02) (26,71)	11,28 bc (0,86) (7,65)	13,89 b (1,59) (11,43)
TL (%)	27,31 a (2,12) (7,76)	19,99 b (2,42) (12,10)	19,48 b (2,45) (12,57)	16,58 b (2,34) (14,12)	19,82 b (2,48) (12,49)
THC (%)	32,22 c (2,82) (8,76)	60,76 b (3,25) (5,35)	72,55 a (2,91) (4,01)	68,41 a (1,68) (2,45)	54,22 b (2,97) (5,47)
C (%)	43,47 a (0,25) (0,58)	40,47 b (0,61) (1,51)	43,33 a (0,35) (0,81)	44,23 a (0,11) (0,26)	43,87 a (0,58) (1,33)
H (%)	5,00 (0,17) (3,46)	5,03 (0,06) (1,15)	5,13 (0,15) (2,97)	5,00 (0,10) (2,00)	5,03 (0,15) (3,03)
O (%)	31,76 d	44,92 b	47,82 a	43,54 b	36,67 c
N (%)	3,93 a (0,25) (6,40)	3,90 a (0,20) (5,13)	3,00 b (0,17) (5,77)	3,13 b (0,11) (3,68)	2,07 c (0,15) (7,39)
S (%)	0,28 b (0,03) (9,45)	0,40 a (0,02) (5,00)	0,31 b (0,00) (1,84)	0,41 a (0,00) (1,42)	0,31 b (0,01) (4,98)

DG = Densidade a granel; TU = Teor de umidade; TMV = Teor de materiais voláteis; TCZ = Teor de cinzas; TCF = Teor de carbono fixo; TET = Teor de extrativos totais; TL = Teor de lignina (Klason); THC = Teor de holocelulose; C = Carbono; H = Hidrogênio; O = Oxigênio; N = Nitrogênio; S = Enxofre. *Valores entre parêntesis correspondem ao desvio padrão e coeficiente de variação(%), respectivamente. Médias seguidas pelas mesmas letras em cada linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade. **Fonte:** Autora (2022).

Quanto aos resultados do teor de umidade, os valores médios das biomassas em base úmida após secagem ao ar livre ficam abaixo de 13%, exceto a biomassa da casca de eucalipto, que obteve 15,46% de umidade. O teor de umidade pode ser definido como o percentual entre o peso da água presente na biomassa e peso da biomassa sólida. Sendo uma das variáveis mais importantes que pode afetar a qualidade da biomassa para finalidade energética, uma vez que influencia no poder calorífico do material, bem como no processo de combustão.

Brand (2010) ressalta que para a biomassa, o teor de umidade deve ser determinado na base úmida, uma vez que expressa a quantidade de água no peso total da amostra na qual será usada no processo para a geração de energia.

Em geral, os teores de umidade das biomassas estudadas estão próximos aos valores identificados na literatura em condições semelhante. A secagem ao ar livre ou em estufa proporciona a redução da umidade no combustível, pois quanto

maior o teor de umidade, maior é a energia utilizada para secar a biomassa no momento da queima. Sendo assim, parte da energia para a finalidade energética será perdida para evaporar a água do próprio combustível, perdendo assim parte de sua qualidade energética.

De acordo com Parigot (2014), alguns especialistas indicam que a biomassa tenha teor de umidade na base úmida abaixo de 30%, o que já é seguido por várias empresas que comercializam biomassa e estão de acordo com a literatura. Segundo Foelkel (2016), não é comum o uso de biomassas florestais por termelétricas com teor de umidade abaixo de 30%, as mesmas geralmente operam com biomassas entre 35% e 50%, o que prejudica a qualidade do combustível. Dessa forma, recomenda-se pelo menos a secagem ao ar livre da biomassa para uso energético.

A lenha, por exemplo, utilizada em fornalha de geradores costuma ter teor de umidade entre 38% e 40%, tendo a possibilidade de redução de 20% de umidade se seca ao ar livre. Tanto a lenha, cavaco e serragem podem reduzir sua umidade ao ar livre como queimados diretamente em caldeiras e termelétricas. Para a umidade de um cavaco chegar a 40%, nível máximo exigido para o mercado, o período de secagem ao ar livre é de 90 dias. Na combustão direta para fins energéticos com utilização em fornos e caldeiras geralmente a umidade é acima de 20%, o que baixa a densidade energética da biomassa (ABREU, 2005; CORRADI, 2021).

Portanto, a umidade possui influência negativa na biomassa para uso energético, pois além de perder parte de sua potência energética, reduzindo assim seu poder calorífico, também pode elevar os custos com transporte, manutenção de equipamentos, necessitando de maior quantidade de biomassa para gerar a mesma quantidade de energia numa combustão em comparação a outro combustível com menor teor de umidade. Brand (2010) menciona que baixo teor de umidade também reduz o consumo do combustível e a perda de calor com gases de escape.

Para a densidade a granel verificou-se que o cavaco de eucalipto e a serragem foram os que obtiveram maiores valores, 342 kg/m^3 e 326 kg/m^3 , respectivamente. Para o potencial energético da biomassa é desejável que as biomassas lignocelulósicas apresentem maiores valores de densidade a granel, uma vez que estão relacionados com a densidade energética do material.

O valor da densidade do cavaco está próximo ao estudo de Corradi (2021), onde a densidade a granel para cavaco de eucalipto de árvores inteiras foi de 361 kg/m^3 com idade de 10 anos. Se tratando de madeira utilizada para fins energéticos,

quanto maior sua densidade e teor de lignina, maior será sua combustibilidade (MACHADO; VOGUEL; SILVA, 2014). A densidade da madeira aumenta com o tempo, ou seja, quanto mais jovem for o lenho, menor será sua densidade, afetando assim seu poder calorífico, o que é desfavorável para uso como insumo energético (KLOCK et al., 2005; LIMA, 2010; NEVES, 2012). Sendo assim, o valor de densidade mais alto no estudo de Corradi (2021) pode ser explicado por tal fato, pois a idade da madeira dos cavacos de eucalipto é de 10 anos, já os desta pesquisa de 7 e 8 anos.

Nesta pesquisa, os resíduos com menor valor de densidade a granel foram bagaço de cana-de-açúcar que obteve 143 kg/m^3 e os resíduos de poda 148 kg/m^3 , valores bem inferiores em comparação aos demais resíduos. Valor este semelhante ao estudo de Jacinto (2017) que embora com espécie diferente (galho de poda de macieira), seu resíduo de poda obteve média de 141 kg/m^3 . Assim como no presente estudo, Oliveira (2016) citou que o menor valor de densidade a granel obtido em suas análises foi o bagaço de cana-de-açúcar (120 kg/m^3), diferentemente da serragem de eucalipto que apresentou um valor duas vezes maior 240 kg/m^3 .

Neste sentido, resíduos com baixa densidade e alto volume dificultam o armazenamento e elevam os custos com transporte, por isso a densidade é de suma importância, pois possui a capacidade de proporcionar dados relacionados ao volume para adequação do tipo de transporte (CARDOSO, 2012). Sendo assim é interessante biomassas de média a alta densidade, pois otimiza o espaço de armazenamento e os custos com transporte, principalmente em maiores distâncias (OLIVEIRA, 2016).

A densidade da madeira pode variar por diversos fatores como espécie, clima, fatores genéticos ou ambientais (ABREU, 2005). O teor de umidade, densidade a granel (base seca) e poder calorífico útil tem influência na densidade energética de qualquer biomassa (FOELKEL, 2016).

Quanto à análise química imediata, de acordo com os resultados obtidos para teor de materiais voláteis, as biomassas de cavaco de eucalipto, serragem e casca de eucalipto obtiveram maiores valores (82,75%, 76,23% e 74,09%), respectivamente. Portanto, geralmente tendem a possuir ignição mais rápida nas etapas iniciais da combustão em temperaturas mais baixas, facilitando a queima da biomassa. Porém, a poda, a casca de eucalipto e a serragem que apresentaram valores mais baixos, possuem ignição mais lenta nas etapas iniciais, em

contrapartida, apresentam maiores teores de carbono fixo, portanto, apresentam queima mais lenta.

No entanto, o processo da queima em geral poderá ser afetado, já que existem dificuldades para o controle dos voláteis. Verificou-se nesta pesquisa, assim como Costa (2018), que a partir de dados obtidos de diversos autores percebeu menor teor de materiais voláteis para os resíduos agrícolas quando comparado com resíduos de madeira na maioria das vezes, porém, conseqüentemente maior teor de cinzas ao final da combustão.

Protásio et al. (2011b) e Jacinto (2017) reforçam que quanto maior o valor de materiais voláteis, mais rápida será a queima do material, portanto, é interessante que o teor de materiais voláteis seja mais baixo para que haja uma queima mais lenta do material sólido. Os valores mais baixos desta pesquisa foram os resíduos de poda com 69,70% e bagaço de cana-de-açúcar com 72,03%.

Sobre os valores obtidos para as biomassas cavaco de eucalipto e serragem, estes se assemelham aos estudos de Juizo, Lima e Silva (2017) que obtiveram uma variação entre 80% e 85% de materiais voláteis para espécies de eucalipto e Jacinto (2017) que obteve o valor de 80,63% para a maravalha de Pinus. Segundo Gmach (2019), para as espécies de eucalipto utilizadas em seu estudo o teor de materiais voláteis variou entre 79,84% e 82,42%. Já no estudo de Watzlawick et al. (2020), para *E. benthamii*, com 6 anos de idade o valor foi de 71,85% para a casca e 82,03% para madeira.

Segundo Arola (1976), quando a madeira e a casca são queimadas, geralmente 75% e 80% são materiais voláteis e 20 e 24% são carbono fixo. Neste estudo, a casca de eucalipto apresentou o valor médio de 74,09%. Os valores obtidos são semelhantes aos da literatura. Para o resíduo de poda urbana, o valor obtido nesta pesquisa ficou abaixo ao de Silva (2018a) que obteve o valor médio de 80,51% para o teor de materiais voláteis para a biomassa in natura.

Quanto ao teor de cinzas, o cavaco de eucalipto obteve 0,40%, sendo o menor valor entre as biomassas, já a casca obteve 5,28%. Habitzreiter et al. (2019) obtiveram em seu estudo teor de cinzas de 0,56% para cavaco de eucalipto e 7,28% para a casca. Watzlawick et al. (2020) encontraram para a madeira de eucalipto 0,34% e para a casca 5,87%. Já o bagaço de cana-de-açúcar obteve 15,56%, sendo o maior valor entre as biomassas e o resíduo de poda obteve um valor alto de 12,06%. Tal fato pode ser explicado, pois segundo Yaman (2004), o teor de cinzas

em espécies de madeiras macias é abaixo de 1%, já em espécies herbáceas e agrícolas, em torno de 15%.

É preferível que a biomassa apresente baixo teor de cinzas. Sendo assim, o cavaco de eucalipto foi o que apresentou menor valor, 0,40%, se enquadrando com o que foi mencionado por Chaves (2013), em que as espécies de eucalipto têm como característica comum entre si os baixos teores de cinzas da madeira, geralmente não ultrapassando 1%.

Segundo Jacinto (2017), altos valores de teor de cinzas, fração não energética, porém afeta diretamente o teor de carbono fixo, pois é computada na equação, afetando assim, a qualidade da biomassa. O autor cita a ISO 17225-2 (2014), onde afirma que o teor de cinzas para uso industrial, o qual é menos restritivo pode chegar a 3%. Dados estes que são opostos aos obtidos para as biomassas de bagaço de cana e poda, indicativos estes que dependendo da composição de outros elementos podem comprometer a qualidade da biomassa. Assim como no estudo do autor, neste estudo a biomassa de poda apresentou um alto valor em relação às biomassas de madeira. Segundo o autor, as biomassas de poda, como galhos e folhas, por exemplo, apresentam teores de cinzas mais altos do que a madeira devido ao processo fotossíntese da planta, pois reservam maior quantidade de minerais que compõe as cinzas após a combustão.

Sendo assim, Silva (2018a) sugere a lavagem da biomassa de poda a fim de reduzir o teor de cinzas, uma vez que os resíduos da biomassa são acondicionados no chão, podendo ocorrer a agregação de minerais, partículas do solo e silicatos.

A quantidade de cinzas irá influenciar na formação de compostos durante a decomposição térmica, o que poderá impactar no equipamento de queima do material, já que são componentes minerais. Os altos valores das biomassas estudadas podem ser também em função do processo de colheita, transporte e armazenagem visto uma possível contaminação com o solo e não apenas dos íons minerais presentes na composição química.

Basso (2017) afirma que o teor ideal de cinzas deve ser inferior a 1,5%. Entretanto para o uso siderúrgico. Santos et. al. (2016), Machado, Voguel e Silva (2014) e Correia et al. (2020) relatam que é conveniente teores de cinzas inferiores a 1% a fim de evitar a redução do seu poder calorífico, criação de fissuras e trincas nos equipamentos, sendo bom indicativo para uso da madeira como combustível em fornos e caldeiras.

A biomassa quando utilizada em fornos, as cinzas podem fundir e produzir depósito de escória e incrustações (GARCÍA et al., 2013). Hoffmann (2010) reforça que quanto menor o teor de cinzas, menor o risco de entupimento e incrustações no equipamento, visto que as cinzas são materiais sólidos que ao final da combustão não são queimadas.

A biomassa quando utilizada em fornos, as cinzas podem fundir e produzir depósito de escória e incrustações (GARCÍA et al., 2013). Além disso, Machado, Voguel e Silva (2014) em sua pesquisa observaram que o maior poder calorífico está relacionado ao menor teor de cinzas e maior teor de carbono fixo.

Comparado a outros estudos, os teores de cinzas obtidos tanto para poda quanto para o bagaço de cana-de-açúcar foram bastantes elevados, o que talvez possa ser justificado por haver impurezas no material advindas de fontes externas adquiridas durante o transporte ou no processamento da matéria prima, como menciona Costa et al. (2020). No estudo de Cortez, Lora e Gómez (2008) também há registro do teor elevado de cinzas, 11,27%, sendo a amostra referente ao bagaço de cana-de-açúcar recém-moído.

Segundo Correia et al. (2020), diferentemente deste estudo e de algumas literaturas, as amostras de bagaço da cana-de-açúcar dos autores apresentaram teor de cinzas variando entre 0,14% e 0,81%, valores bem abaixo dos obtidos. No entanto, suas amostras estavam armazenadas por 3 anos a céu aberto, o que possivelmente permitiu a lavagem das impurezas e demais materiais inorgânicos pelas águas das chuvas como cita o autor, sendo assim, quando comparado ao valor anterior do bagaço recém-moído é observada a redução do teor de cinzas.

Quanto ao teor de carbono fixo, as biomassas que apresentaram os maiores valores foram Casca de eucalipto com 20,63% e serragem com 20,09%. Portanto, a serragem além de possuir uma ignição rápida em baixa temperatura terá maior tempo de combustão, o que significa, de acordo com Juízo, Lima e Silva (2017), que possuem melhor rendimento e qualidade para carbonização e queima. No entanto, o uso da serragem necessita de certas intervenções para uso, como a densificação. De acordo com Costa et al. (2017), necessita-se de menor quantidade dessa biomassa para a queima, resultando em menores intervenções para abastecimento.

É essencial altos teores de carbono fixo para maior tempo de combustão e melhor qualidade da biomassa. Quanto maior o valor em um combustível, menor o teor de materiais voláteis, ambos possuem relação inversamente proporcional. Este

possui relação direta com o teor de materiais voláteis, pois influenciam diretamente na queima do combustível devido ao fato de quando aquecidos, o teor de materiais voláteis queima de forma mais rápida na forma gasosa, diferentemente do teor de carbono fixo que queima mais devagar na forma sólida, principalmente em temperaturas mais elevadas. Estas variáveis estão relacionadas com o poder calorífico (BRITO; BARRICHELO, 1978; CHAVES, 2013; MACHADO; VOGUEL; SILVA, 2014; BASSO, 2017; JACINTO, 2017; JUIZO; LIMA; SILVA, 2017; CORRADI, 2021).

Para apresentar um padrão de queima ideal para produção de energia, a biomassa deve apresentar o teor médio de carbono fixo em torno de 17,40% (OLIVEIRA et al., 2017). De acordo com Brito e Barrichelo (1978), para diversas variedades de eucalipto o carbono fixo varia entre 10% e 25%, onde valores dentro desse intervalo foram obtidos por Juizo, Lima e Silva (2017), com teores variando entre 14,47% e 18,89% para a madeira de nove espécies de eucalipto.

O teor de carbono fixo está relacionado positivamente com o poder calorífico. Segundo Juizo, Lima e Silva (2017), o carbono fixo é uma variável importante para avaliar a qualidade da biomassa, porém outras variáveis também estão correlacionadas entre si para avaliar a viabilidade de uso como combustível seja na indústria siderúrgica ou consumo urbano e rural. Os dados que apresentam maior poder calorífico geralmente estão relacionados ao menor teor de cinzas e maior teor de carbono fixo (MACHADO, VOGUEL E SILVA, 2014).

O teor de carbono fixo da casca de eucalipto (20,63%) foi superior ao obtido pelo cavaco de eucalipto (16,85%), em contrapartida seu valor de materiais voláteis inferior, assim como no estudo de Brito e Barrichelo (1978), o que contribui para o aumento do poder calorífico da biomassa. O cavaco apresentou um dos menores valores de teor de carbono fixo, o que pode ser justificado pela proporção inversa mencionado por Protásio et al. (2011b) e Jacinto (2017). No entanto o menor teor de cinzas, mais importante que os voláteis, por não ser energético.

No estudo de Juizo, Lima e Silva (2017) avaliando a casca de nove espécies de eucalipto, obtiveram valores entre 22,96% e 31,30%, valores próximos, porém superiores ao deste estudo.

O valor de carbono fixo obtido para cavaco de eucalipto (16,85%) neste estudo se assemelha a resultados para a mesma espécie, como o obtido por Belini (2018) de 13,87% e de Juizo, Lima e Silva (2017) que obtiveram valores entre

14,46% e 18,88% para diferentes espécies de clones de eucalipto. Quanto ao carbono fixo obtido para o bagaço de cana-de-açúcar neste estudo foi o menor valor entre as biomassas, obtendo 12,41%, em virtude do alto teor de cinzas, valor semelhante a Belini (2018) 14,40%.

Já o valor de carbono fixo da serragem neste estudo (20,09%) foi maior do que o resultado obtido por Jacinto (2017) de 18,91% para maravalha de Pinus, assim como o resultado da poda de macieira onde o autor encontrou valores de 17,54%. Silva (2018a) para o resíduo de poda da cidade do Recife encontrou o valor de 15,90%, neste estudo o valor foi de 18,24%, próximos aos encontrados na literatura.

Quanto ao teor de extrativos totais, o bagaço de cana obteve o maior valor 24,90%, a poda 13,89%, a casca de eucalipto obteve 13,97%, a serragem 11,28% e cavaco de eucalipto 7,58%, este último apresentou o menor valor entre as biomassas.

Os extrativos totais, segundo Klock et al. (2005), a madeira seca é composta de 3% a 10% de extrativos, os quais contribuem para o poder calorífico. Portanto, a quantidade de extrativos presentes na madeira é um fator positivo para a combustão direta, pois facilita a decomposição da estrutura da madeira (PROTÁSIO et al., 2013b). Assim, maiores teores desses componentes contribuem para o aumento do poder calorífico da madeira, pelo fato, de apresentarem elevada quantidade de carbono, principalmente os extrativos de natureza fenólica. De acordo com Barbosa (2018) este percentual pode variar devido a diversos fatores como, características das espécies, preparo das amostras, condições climáticas, solo, região, dentre outros fatores, podendo chegar de 1,6% a 57,9% segundo a literatura.

Se tratando de madeira, outro fator importante que interfere no teor de extrativos é a idade. Soares et al. (2015) reforçam que quanto mais jovem a espécie arbórea, maior o teor de extrativos. Neste estudo foram trabalhadas espécies de *Eucalyptus* com idades diferentes.

Quanto ao bagaço de cana-de-açúcar, no estudo de Oliveira (2016) apresentou valor de 15% de teor de extrativos totais, já nesta pesquisa obteve-se o valor de 24,90%, o maior percentual entre as biomassas estudadas. Porém, assim como neste estudo, a autora evidenciou um valor bem maior para o bagaço de cana-de-açúcar, no entanto, alto valor de cinzas em comparação ao cavaco de eucalipto e Serragem. Quanto ao resíduo de poda obteve-se o valor de 13,89%, valor superior

ao encontrado por Silva (2018a) de 3,58%. Segundo Miranda (2021) as cascas são mais complexas do que a madeira em relação a composição química, além da variabilidade entre espécies, o que pode justificar a diferença de teor de extrativos entre as biomassas florestais.

Quanto ao teor de lignina, os resultados obtidos nesta pesquisa variaram de 16,58% a 27,31%. A biomassa que apresentou maior valor foi o bagaço de cana-de-açúcar com 27,31%. Já a serragem apresentou 16,58%, sendo o menor valor e as demais biomassas deste estudo apresentaram em torno de 19%.

A lignina é o componente da biomassa que apresenta maior resistência nos processos de degradação térmica (WANG et al., 2011; PUÑAL et al., 2012), sendo de grande importância na utilização energética da biomassa. De acordo com Silva et al. (2014) a lignina possui menor quantidade de oxigênio em sua composição quando comparados com a hemicelulose e celulose. Além disso, os componentes do lenho possuem estruturas complexas com mais carbono, o que durante o processo de combustão tendem a liberar maiores quantidades de energia.

É preferível que a biomassa obtenha alto teor de lignina, pois elas têm influência positiva no poder calorífico, auxiliando como agente natural de ligação do material facilitando o processo de compactação. Ela também possui maior teor de carbono e maior estabilidade térmica em relação à celulose e hemicelulose. (PROTÁSIO et al., 2013a; BOSCHETTI et al., 2019).

Dependendo da espécie vegetal, o teor de lignina na madeira pode variar entre 15% e 30% (SANTOS, 2008). Em base seca o teor de lignina varia entre 20% e 40% em madeiras macias e folhosas e em torno de 10% a 40% em espécies herbáceas, como por exemplo, o bagaço e a palha da cana-de-açúcar, portanto, os valores estão próximos aos citados na literatura (YAMAN, 2004; KLOCK et al., 2005). Cardoso (2012) afirma que a lignina tende a variar entre 18% e 24% em espécies madeireiras.

No estudo de Silva (2018a) o resíduo de poda urbana coletado no município de Recife, estado de Pernambuco, apresentou média de 15% de lignina, valor semelhante ao deste estudo. Segundo Klock et al. (2005), espécies de madeira folhosa podem apresentar teor de lignina na faixa de 20%. Portanto, os resultados obtidos estão semelhantes aos das literaturas encontradas.

Em pesquisa realizada por Soares et al. (2014) para teor de lignina em espécies de eucalipto de 3 a 5 anos de idade obteve o valor médio de 21%, valores

próximos aos resultados obtidos para a casca e cavaco de eucalipto.

Para os valores obtidos neste estudo da variável teor de holocelulose, o cavaco de eucalipto apresentou o maior valor (72,55%), semelhante ao obtido por Barreiros et al. (2021), variando entre 72% e 74% para 3 espécies de eucalipto com idade de 7 anos. O menor valor encontrado foi do bagaço de cana-de-açúcar, com teor de 32,22%. Já o resíduo de poda, apresentou valor médio de 54,22% para o teor de holocelulose, abaixo do encontrado no estudo de Silva (2018a) que obteve média de 76%. Segundo Lopes (2017), atos valores na casca da madeira podem viabilizar o uso da biomassa para produção de etanol celulósico, por exemplo.

Sendo assim, a holocelulose, lignina e extrativos totais tiveram influência significativa no poder calorífico da biomassa, pois o bagaço de cana-de-açúcar apresentou os valores mais desejáveis das variáveis e obteve os melhores valores de poder calorífico, apesar do alto teor de cinzas.

Quanto ao teor de holocelulose, ele não possui influência positiva na utilização da biomassa para fins energéticos, pois um alto teor tende a reduzir o poder calorífico e a densidade da biomassa, ou seja, o material se consumiria mais rápido, obtendo assim menor aproveitamento da energia do resíduo.

No estudo de Santos (2008), foi observada alta significância entre a densidade básica e lignina, sendo assim, devido à lignina possuir relação inversa com a holocelulose, o mesmo comportamento foi observado para a densidade básica. A holocelulose e a lignina são os principais componentes estruturais da biomassa, sendo interessante que o combustível possua menor teor de holocelulose e maior teor de lignina para produção de energia.

Portanto, quanto menor for o teor de holocelulose e maior o teor de lignina, melhor para o aproveitamento térmico da biomassa (BUFALINO et al., 2012; PROTÁSIO et al., 2012). Segundo Carvalho et al. (2021) a heterogeneidade dos materiais e impurezas encontradas nas cascas (sílica), poda (diversas espécies e diferentes partes, folhas) e serragem pode interferir nas análises de lignina e extrativos.

De acordo com o estudo de Klock et al. (2005), o teor de holocelulose da madeira geralmente se encontra em torno de 65% a 75%. No estudo de Neves (2012), a idade foi um fator determinante nos níveis de holocelulose da madeira, pois quanto maior a idade, menor o teor de holocelulose.

Quanto aos resultados obtidos na análise química elementar, sobre os valores dos teores de carbono elementar encontrados, a casca de eucalipto foi a única que se diferenciou significativamente das demais biomassas, sendo este teor de 40,47% o menor valor encontrado. Entre as biomassas, o maior valor foi a serragem (44,23%), já a poda, o bagaço de cana-de-açúcar de açúcar e o cavaco de eucalipto obtiveram 43,87%, 43,47% e 43,33%, respectivamente.

Quanto ao teor de Carbono, Lopes (2017) obteve para a casca de clones de *Eucalyptus spp* e *Corymbia spp*. que variou entre 43,68% e 45,36%. O autor observou em diversos estudos que geralmente a madeira apresenta teor de carbono maior que a casca que variaram entre 44,04% e 44,79%, ou seja, com uma diferença pouco significativa.

Para o teor de hidrogênio não houve diferença significativa, com teor de 5% para todas as biomassas estudadas. Quanto ao teor de oxigênio, o menor teor encontrado foi o do bagaço da cana-de-açúcar (31,76%) e o maior valor foi o cavaco de eucalipto (47,82%), as biomassas de casca de eucalipto, serragem e poda, obtiveram 44,92%, 43,54% e 36,67, respectivamente.

Sobre a importância da análise elementar para avaliação da utilização de uma biomassa como combustível para finalidade energética, segundo Lopes (2017) são os principais elementos químicos constituintes da biomassa florestal. Nesta análise, os dois principais liberadores de energia são carbono e hidrogênio, portanto, é preferível valores altos para maior poder calorífico. No estudo de Soares et al. (2015) foi percebido que assim como a densidade e teor de extrativos o teor de carbono e relação C/H da madeira aumentaram com a maturidade da árvore.

Na literatura foram encontrados valores de hidrogênio próximos, sendo o bagaço de cana-de-açúcar de 7,01% por Grotto et al. (2021), teor de 6,31% para serragem no estudo de Nobre et al. (2015), por Reis et al. (2012) o teor médio de 6,14% para madeira de *Eucalyptus urophylla*, e, por Vissotto et al. (2012) de 6% para casca de eucalipto.

De acordo com Brand (2010) os elementos da composição elementar formam as substâncias orgânicas da biomassa (poliméricas - ligninas, carboidratos - celulose e polioses, extrativos) que formam a parede celular ou estão livres no lume das células. E como a lignina é rica em carbono e hidrogênio, ou seja, elementos que produzem calor, portanto é de suma importância no processo térmico, devido proporcionar maior poder calorífico.

Sendo assim, é desejável baixos valores, pois o oxigênio se correlaciona negativamente com o poder calorífico. Este elemento quando em maior quantidade tende a reduzir o poder calorífico da biomassa, apesar do oxigênio ser essencial para a combustão do material. Sendo assim, é desejável biomassas com maiores teores de carbono e hidrogênio aliado a menores teores de oxigênio e cinzas, pois contribuirá para o melhor desempenho na produção de bioenergia (PROTÁSIO et al., 2011a; LOPES, 2017).

Foi observado no estudo de Neves (2012) que os componentes elementares da madeira de eucalipto tendem a reduzir o valor com o aumento da idade, exceto o oxigênio, onde foram avaliados clones com idade de 46 e 58 meses, no entanto, tal fator não afetou de forma significativa o poder calorífico superior.

As biomassas possuem em sua composição elementar (C, H, O, N e S), porém, enxofre em menor proporção em relação aos demais elementos. Portanto, possui papel essencial na utilização da madeira como biocombustível, além de não ser a única análise química de importante avaliação, a mesma possui relevância devido aos teores de carbono e hidrogênio quando inversamente proporcionais a quantidade de oxigênio. O mesmo possui correlação com o aumento ou diminuição do poder calorífico. Espera-se que a biomassa vegetal que possuir alto teor de carbono e hidrogênio e baixo teor de oxigênio, tenha maior poder calorífico (VALE et al., 2000; YAMAN, 2004; PAULA et al., 2011, PROTÁSIO et al., 2011a).

Para o nitrogênio o maior valor foi do bagaço de cana-de-açúcar (3,93%) e o menor foi o resíduo de poda (2,07%). A casca de eucalipto obteve 3,90%, a serragem 3,13% e o cavaco de eucalipto 3,00%.

O baixo teor de nitrogênio não compromete o uso da biomassa em relação a bioenergia, porém é preferível menores teores desse componente na biomassa, pois possui correlação negativa com o poder calorífico e possui alta toxicidade, contribuindo assim para a poluição ambiental (HUANG et al., 2009; REIS et al., 2012).

Quanto ao teor de enxofre, a biomassa que apresentou maior valor foi a serragem (0,41%) e o menor o do bagaço de cana-de-açúcar (0,28%). A biomassa do cavaco de eucalipto obteve o valor 0,40% e o cavaco de eucalipto e o resíduo de poda, ambos 0,31%. O teor de enxofre não possui correlação positiva com o poder calorífico, portanto, é desejável baixos valores desta variável. Para siderurgia é

necessário que o valor esteja abaixo de 0,5%, portanto os valores são aceitáveis para tal finalidade (NEVES, 2012; REIS et al., 2012).

4.2 Caracterização energética das biomassas

Na Tabela 2 evidenciam-se os resultados do PCS, PCI, PCU e densidade energética.

Tabela 2 – Valores médios das propriedades energéticas das biomassas avaliadas

Tratamentos	Bagaço de Cana	Casca de eucalipto	Cavaco de eucalipto	Serragem	Poda
	18405 a	17494 c	18024 ab	18115 ab	17785 bc
PCS (KJ/Kg)	(229,38)(1,25)	(254,61)(1,45)	(93,98)(0,52)	(105,57)(0,58)	(229,52)(1,29)
	18135 a	17222 c	17747 ab	17845 ab	17514 bc
PCI (KJ/Kg)	(229,38)(1,26)	(254,61)(1,48)	(93,98) (0,53)	(105,57)(0,59)	(229,52)(1,31)
	15656 a	14470 b	15551 a	15699 a	15317 a
PCU (KJ/Kg)	(220,22)(1,41)	(532,35)(3,68)	(86,59) (0,56)	(108,39)(0,69)	(94,07) (0,61)
	1,62 c	3,36 b	6,16 a	5,91 a	2,63 b
DE (GJ/m³)	(0,17) (6,63)	(0,03) (0,83)	(0,05) (0,82)	(0,35) (6,01)	(0,51) (19,25)

PCS = Poder calorífico superior; PCI = Poder calorífico inferior; PCU = Poder calorífico útil; DE = Densidade energética. *Valores entre parêntesis correspondem ao desvio padrão e coeficiente de variação (%), respectivamente. Médias seguidas pelas mesmas letras em cada linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade. **Fonte:** Autora (2022).

Para o PCS, o bagaço de cana-de-açúcar (18.405 KJ/Kg), serragem (18.115 KJ/Kg) e cavaco de eucalipto (18.024 KJ/Kg) foram as biomassas que apresentaram os maiores valores e são estatisticamente semelhantes entre si, porém a poda foi semelhante estatisticamente a serragem, cavaco e casca de eucalipto, talvez por serem eudicotiledôneas, já a cana é diferente por ser gramínea. Esse fato é possivelmente devido à constituição química das biomassas.

Para o uso energético, o alto valor para o poder calorífico da biomassa é desejável, pois representa o potencial de combustão, estando diretamente ligado à eficiência do seu potencial de queima, ou seja, a quantidade de energia que é liberada durante a degradação térmica de um combustível. Entretanto, o mesmo depende de diversos fatores tais como densidade, umidade, composição química, energética e o tipo de biomassa.

A serragem também apresentou um dos maiores valores 18.115 KJ/Kg. Ela apresentou o melhor teor de umidade 11,64%, o segundo menor teor de cinzas 3,69%, melhor PCU 15.699 KJ/Kg e melhor teor de Carbono elementar 44,23%.

O valor do PCS foi menor do que o encontrado por Oliveira et al. (2017) com a biomassa residual de *Pinus sp* coletada em uma serraria, onde os autores obtiveram a média de 19.800 KJ/Kg. A casca de eucalipto apresentou o menor valor (17.494 KJ/Kg) em comparação às demais biomassas. Este valor se encontra dentro do intervalo encontrado por Juizo, Lima e Silva (2017), onde o PCS da casca de eucalipto variou entre 13.850 KJ/Kg e 19.550 KJ/Kg.

Estatisticamente os valores do poder calorífico inferior apresentaram o mesmo comportamento do poder calorífico superior, sendo o bagaço de cana (18.135 KJ/Kg) o maior valor seguido pela serragem (17.845 KJ/Kg) e cavaco de eucalipto (17.747 KJ/Kg).

Quanto ao poder calorífico inferior, segundo Cardoso (2012), a média do poder calorífico inferior do bagaço de cana é de 8.911 KJ/Kg considerando 50% de umidade, valor inferior ao encontrado neste estudo onde obteve-se 18.135 KJ/Kg, já para a lenha é de 12.970 KJ/Kg, média essa inferior ao encontrado para as biomassas madeiras, onde o cavaco de eucalipto obteve o valor de 17.747 KJ/Kg. Já a casca do eucalipto, no presente estudo, obteve o menor valor, 17.222 KJ/Kg. O mesmo autor classifica o bagaço da cana-de-açúcar uma biomassa como vantajosa na combustão direta, pois não necessitam de processamento anterior, podendo ser utilizadas após a colheita.

Quanto ao poder calorífico útil, o bagaço da cana-de-açúcar e a serragem apresentaram 15.656 KJ/Kg e 15.699 KJ/Kg, respectivamente, e, com o menor valor a casca de eucalipto, com 14.470 KJ/Kg.

Quanto aos valores obtidos da densidade energética nas biomassas avaliadas, a que apresentou maior valor foi o cavaco de eucalipto (6,16 GJ/m³), seguido pela serragem (5,91 GJ/m³). O resíduo do bagaço de cana apresentou o menor valor entre as demais (1,62 GJ/m³) juntamente com a poda (2,63 GJ/m³).

Sendo assim, a densidade energética apresenta as características químicas, condições de umidade e calor contido no produto final apenas nesta variável, possibilitando melhor avaliação de uso com finalidade energética de um combustível (SOUZA; VALE, 2016).

A umidade, densidade a granel (base seca) e poder calorífico útil apresentam influência direta na densidade energética (FOELKEL, 2016). Tal fato é compatível com os resultados obtidos, onde o cavaco de eucalipto e serragem que apresentaram maiores valores de densidade energética obtiveram os maiores

valores de densidade a granel, os menores teores de umidade e a serragem apresentou o maior valor de poder calorífico útil e o cavaco alto valor em comparação às demais biomassas.

No estudo de Oliveira et al. (2017) o resíduo de serragem de Pinus obteve o valor de 2,96 GJ/m³, valor bem abaixo deste estudo.

4.2.1 Índice de valor combustível (IVC)

Na Figura 14 observam-se os valores obtidos para o IVC, determinados em função da variável teor de umidade, cinzas, densidade a granel e poder calorífico superior.

Para o resultado, considerou-se no cálculo o valor médio das principais características do índice de classificação ideal que elevariam o potencial energético de cada biomassa, como alto poder calorífico superior, alta densidade a granel, baixo teor de cinzas e baixo teor de umidade.

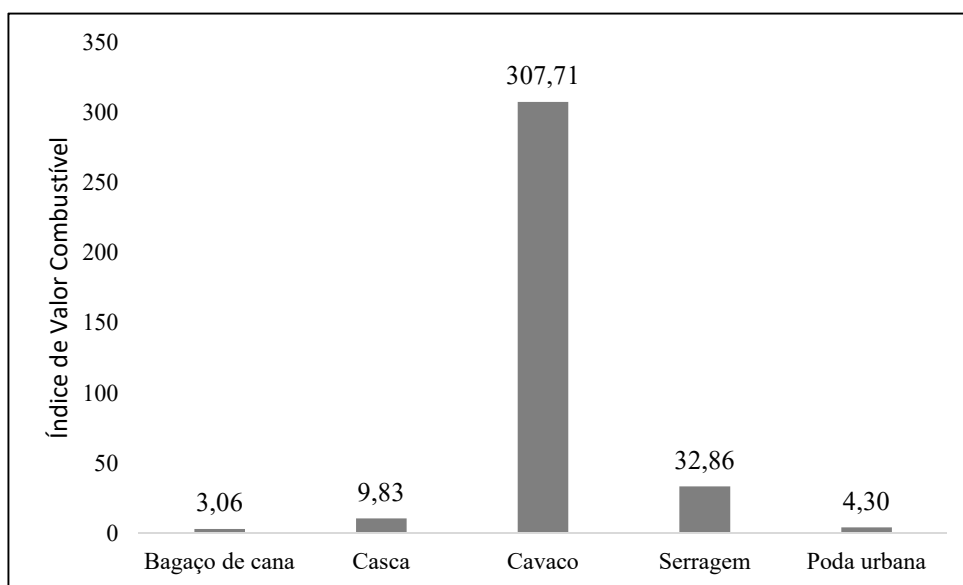


Figura 14 – Índice de valor combustível. **Fonte:** Autora (2022).

Espera-se que o maior índice seja para a biomassa que apresente os menores teores de umidade e teores de cinzas e maiores valores para a densidade a granel e poder calorífico (PUROHIT; NAUTIYAL, 1987; BHATT; TODARIA, 1992; JAIN; SINGH, 1999). Dessa forma, a biomassa cavaco de eucalipto foi a que apresentou o maior IVC, pois tende a possuir as melhores características para obtenção do índice (alto poder calorífico, melhor densidade a granel, menor teor de

cinzas e baixo teor de umidade) em comparação às demais biomassas. O bagaço de cana apesar do alto valor para o poder calorífico, obteve o menor IVC, devido aos valores obtidos para as demais variáveis que influenciam no índice.

Mayer (2016) ressalta que as variáveis utilizadas na obtenção do IVC podem sofrer muitas variações, principalmente o teor de umidade uma vez que pode ser controlado e quanto mais seco estiver o combustível, espera-se melhor resultado para o IVC.

4.3 Análise de Componentes Principais (PCA)

Observa-se por meio do gráfico biplot (Figura 15), os resultados da análise de componentes principais das variáveis para as biomassas estudadas, a fim de agrupar amostras com perfis semelhantes, bem como compreender a relação entre elas. As duas primeiras componentes explicaram 76,75% da variabilidade total dos dados, 48,15% e 28,60% para as componentes 1 e 2, respectivamente, sendo as informações mais relevantes estão contidas nessas duas componentes principais.

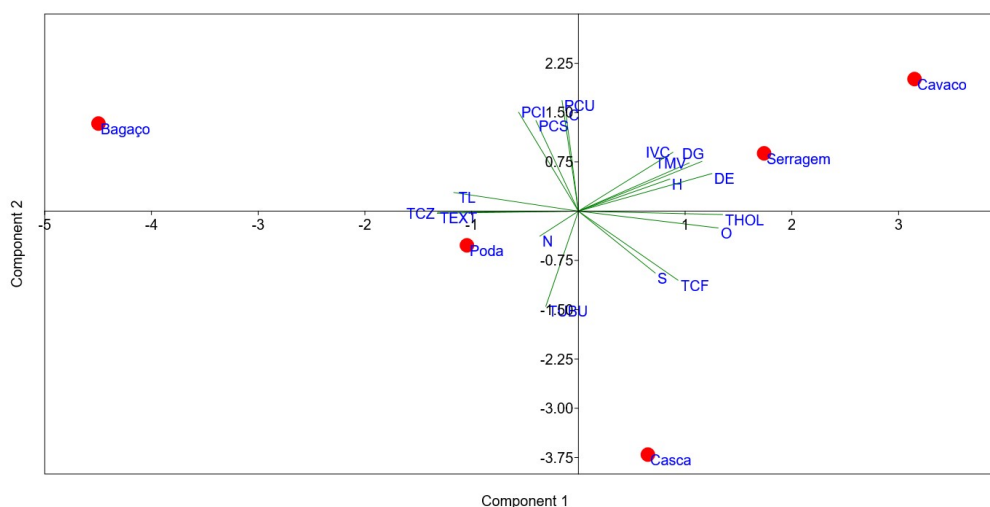


Figura 15 – Diagrama de ordenação dos tratamentos considerando os escores e autovetores dos componentes principais 1 e 2. **Fonte:** Autora (2021).

Ao analisar a contribuição de cada variável nas componentes principais, verifica-se as variáveis com maior contribuição para a componente 1 são referentes a composição química das biomassas (todas da química imediata, molecular e elementar com exceção do Carbono). E para a componente 2 as variáveis referentes ao poder calorífico (superior, inferior e útil), o teor de carbono, teor de umidade, IVC e densidade energética foram as que apresentaram as maiores contribuições. Assim

é possível distinguir os grupos de biomassa por meio das variáveis desejadas visando o potencial energético, verifica-se um grupo para as biomassas serragem e cavaco de eucalipto, e outros separadamente para bagaço de cana-de-açúcar, casca de eucalipto e poda.

4.4 Características mais e menos desejáveis das biomassas em relação às análises

Dentre as biomassas estudadas e as análises realizadas, conforme demonstrado no quadro 2, as que obtiveram o melhor poder calorífico foi o bagaço da cana-de-açúcar, seguido pela serragem e cavaco de eucalipto. Apesar do bagaço de cana ser a biomassa que apresentou mais variáveis desfavoráveis em relação às demais biomassas, ele apresentou o maior poder calorífico superior e inferior. Entretanto, este resíduo obteve valores desejáveis que contribuíram para este resultado, como por exemplo, os melhores valores na química molecular (TET, TL e THC (menor valor)), menor valor de oxigênio e enxofre, além de alto teor de carbono em relação às demais biomassas, portanto, estas variáveis foram essenciais no resultado do melhor poder calorífico.

Quadro 2 – Características mais e menos desejáveis das biomassas em relação às análises

Análises	Bagaço de cana-de-açúcar	Casca de eucalipto	Cavaco de eucalipto	Serragem	Poda
DG (Kg/m ³)	143	192	342	326	148
TU (%)	13,23	15,46	11,97	11,64	12,12
TMV (%)	72,03	74,09	82,75	76,23	69,70
TCZ (%)	15,56	5,28	0,40	3,69	12,06
TCF (%)	12,41	20,63	16,85	20,09	18,24
TET (%)	24,90	13,97	7,58	11,28	13,89
TL (%)	27,31	19,99	19,48	16,58	19,82
THC (%)	32,22	60,76	72,55	68,41	54,22
PCS (KJ/Kg)	18405	17494	18024	18115	17785
PCI (KJ/Kg)	18135	17222	17747	17845	17514
PCU (KJ/Kg)	15656	14470	15551	15699	15317
DE (GJ/m ³)	2,64	3,36	6,16	5,91	2,63

Análises	Bagaço de cana-de-açúcar	Casca de eucalipto	Cavaco de eucalipto	Serragem	Poda
IVC	3,06	9,83	307,71	32,86	4,30
C (%)	43,47	40,47	43,33	44,23	43,87
H (%)	5,00	5,03	5,13	5,00	5,03
O (%)	31,76	44,92	47,82	43,54	36,67
N (%)	3,93	3,90	3,00	3,13	2,07
S (%)	0,28	0,40	0,31	0,41	0,31

Valores grifados em vermelho = Característica menos desejável; valores grifados em verde = Característica mais desejável. **Fonte:** Autora (2022).

Grotto et al. (2021) também atribuíram o alto valor do poder calorífico do bagaço da cana-de-açúcar ao teor de carbono (44,25%) e teor de lignina (27,95%), neste estudo estas variáveis também foram importantes na determinação, assim como na literatura, além disso, estes valores estão bem próximos aos encontrados neste estudo. Já a serragem o melhor poder calorífico útil, seguida do bagaço de cana-de-açúcar e cavaco de eucalipto. A biomassa que apresentou menor PCS, PCI e PCU foi a casca de eucalipto. Sendo assim, as biomassas bagaço de cana-de-açúcar, serragem e o cavaco de eucalipto apresentaram valores semelhantes de poder calorífico sendo considerados os melhores combustíveis para uso energético.

Neste sentido, diversos fatores podem interferir e influenciar na qualidade da biomassa para finalidade energética, como as variações físicas, químicas e energéticas, localização geográfica, genética da espécie, clima, espaçamento, dentre outros fatores. Sendo assim, reforço a importância do estudo e conhecimento da espécie utilizada, além de suas propriedades para melhor determinação para a finalidade a que se destina, para seu maior aproveitamento e melhor qualidade energética da biomassa.

Sendo assim, é de suma importância a caracterização energética da biomassa tanto para finalidades energéticas, como também para subprodutos. No estudo de Braz (2014) pôde-se observar que a carbonização da biomassa aumenta seu poder calorífico e seu teor de carbono fixo. Portanto, após a carbonização os valores das variáveis aumentaram significativamente quando comparadas às biomassas in natura que apresentam maior quantidade de materiais voláteis. Sendo assim, é uma opção para melhorar a qualidade energética de algumas biomassas com baixo teor desta variável.

Outra opção é o adensamento e a compactação, como por exemplo, a produção de briquetes ou pellets como finalidade de aumentar a densidade da biomassa e assim, seu poder calorífico. Portanto, quanto menor o diâmetro, aumentando sua área de contato na combustão e mais homogênea a biomassa, melhor será sua qualidade energética. Oliveira et al. (2017) relataram que após a produção de briquetes notou-se um aumento de 8 vezes de sua densidade in natura, o que é um dos principais fatores para melhorar a qualidade energética de uma biomassa. Sendo assim, alguns resíduos com baixa densidade energética, além de aumentar seu poder calorífico e sua densidade, ocasionará redução de custos com transporte, principalmente em longas distâncias de sua fonte de geração.

Uma opção para as cinzas residuais do processo é que podem ser utilizadas como produtos na construção civil, como por exemplo, para produção de argamassas cimentícias. Sendo uma estratégia promissora, sustentável e com baixo custo. As cinzas também podem ser utilizadas na reatividade do biochar. Outra opção é misturar a biomassas que apresentam valores de cinzas elevados com outros materiais sob forma de blendas.

5. CONCLUSÕES

- A biomassa com melhor qualidade energética é o bagaço de cana-de-açúcar, pois possui o maior poder calorífico superior e inferior, além de alto poder calorífico útil. Já a biomassa com menor potencial energético é a casca de eucalipto, pois apresentou o menor PCS, PCI e PCU;
- A biomassa da serragem e cavaco de eucalipto também possuem alto potencial energético, pois apresentaram valores semelhantes de PCS e PCI ao bagaço de cana e a serragem apresentou melhor PCU. Já o cavaco apresentou melhor densidade energética e IVC, seguido da serragem;
- As variáveis imprescindíveis para o maior poder calorífico do bagaço da cana-de-açúcar foram análise química molecular, teores de oxigênio, enxofre e carbono;
- Todas as biomassas são viáveis para uso como combustível para

geração de energia. O bagaço de cana-de-açúcar e a poda apresentaram elevado teor de cinzas, provavelmente advindo de contaminação com o solo, colheita, transporte, armazenamento ou processamento, porém não são inviabilizados para tal finalidade;

- Espera-se maior eficiência energética das biomassas com baixo teor de umidade, assim o ideal seria a secagem do material em estufa, a depender também do uso do resíduo, de forma direta no processo de queima ou na produção de subprodutos como briquete e pellets ou outra conversão energética.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, P. H. F. **Formas de aproveitamento do resíduo de madeira**. 2005. 46 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2005.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília, DF, 2020, ANEEL, p. 77-92.

ARAÚJO, A. P. C. **Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestor anaeróbico**. 2017. 42 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

AROLA, R. A. 1976 - Wood Fuels - How do they stack up? **Forest Products Research Society**. November 15-17, Atlanta, Georgia, 12 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos sólidos - Classificação**. NBR 10004. Rio de Janeiro, RJ, 2004. 71 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Amostragem de resíduos sólidos**. NBR 10007. Rio de Janeiro, RJ, 2004. 21 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Madeira – Determinação do teor de umidade de cavacos** - Método por secagem em estufa. NBR 14929. Rio de Janeiro, RJ, 2017. 17 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Carvão vegetal - Ensaio físicos - Determinação da massa específica - Densidade a granel**. NBR 6922. Rio de Janeiro, RJ, 1981. 2 p.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for gross calorific value of refuse-derived fuel by the bomb calorimeter**. West Conshohocken, PA, USA. E711-87, 2004. 9 p.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal**. West Conshohocken, PA, USA. D1762-84, 2013. 2 p.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard Practice for Ultimate Analysis of Coal and Coke**. West Conshohocken, PA, USA. D-3176-15, 2015. 4 p.

ASTM - American Society for Testing and Material. **Standard test method for gross calorific value of refuse-derived fuel by the bomb calorimeter**. West Conshohocken, PA, USA. ASTM-D-3176, 2004. 14 p.

AZEVEDO, S. R. V. **Caracterização da madeira e do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* cultivados em diferentes espaçamentos no sertão de Pernambuco**. 2021. 80 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2021.

BARBOSA, P. S. **Procedimentos para caracterização química do bagaço de cana-de-açúcar: estudos para otimização e padronização**. 2018. 60 f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

BARREIROS, R. M.; RIBEIRO, G. P.; DIAS, K. B.; GOUVÊA, C. F.; REIS, A. M. F.; SILVA, G. C. Potencialidade energética da madeira de três espécies de eucalipto. In: Oliveira, Robson José. **Recursos naturais: energia de biomassa florestal**. Editora científica digital, p. 146 - 164. 2021.

BARROS, M. V. **Avaliação do ciclo de vida de geração de energia elétrica no Brasil: histórico e perspectivas futuras em termos de aquecimento global**. 2017. 71 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

BASSO, S. **Análise do carvão vegetal para uso doméstico**. 2017. 42 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

BBC NEWS BRASIL. **Os detalhes e problemas do histórico acordo da COP27 para ajudar países mais afetados por mudanças climáticas**. 2022. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/internacional-63693858>>. Acesso em 06. fev. 2023.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ, Interciência, 2010. 114 p.

BELINI, G. B.. **Termogravimetria aplicada para caracterização da biomassa**. 2018. 68 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) - Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2018.

BELTRÃO, B. A.; MASCARENHAS, J. C.; MIRANDA, J. L. F.; SOUZA JR, L. C.; GALVÃO, M. J. T. G.; PEREIRA, S. N. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea: diagnóstico do município de Araripina, estado de Pernambuco**. CPRM/PRODEEM, 2005.

BEZERRA NETO, E.; BARRETO, L. P. **Análises químicas e bioquímicas em plantas**. 1. ed. Recife, PE, UFRPE, 2011. 261 p.

BHATT, B. P.; TODARIA, N. P. Firewood characteristics of some mountain trees and shrubs. **Commonwealth Forestry Review**, Oxford, v. 71, n. 3-4, p. 183-185, 1992. DOI: 10.1016/0144-4565(90)90067-T. Disponível em:<<https://www.jstor.org/stable/42608536>>. Acesso em: 13 abr. 2022.

BOSCHETTI, W. T. N.; LOPES, A. C. P.; RIBEIRO, R. A.; REYES, R. Q.; CARNEIRO, A. C. O. Kraft Lignin as na assitive in *Pine* and *Eucalyptus* particle composition for briquete production. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 43, n. 2, p. 1-8, 2019.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n.9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências**. Presidência da República Casa Civil Subchefia para Assuntos Jurídicos, 2010. Disponível em:<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm>. Acesso em: 08 nov. 2021.

BRAZ, C. E. M. **Caracterização de biomassa lignocelulósica para uso em processos térmicos de geração de energia**. 2014. 116 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2014.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. **Características do eucalipto como combustível: análise química imediata da madeira e da casca**. Piracicaba, SP, IPEF, n. 16, p. 63-70, 1978.

BUFALINO, L.; PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; NASSUR, O. A. C.; SÁ, V. A.; TRUGILHO, P. F.; MENDES, L. M. Caracterização química e energética para aproveitamento da madeira de costaneira e desbaste de cedro australiano. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, PR, v. 32, n. 70, p. 129-137, 2012.

CABREIRA, M. P. **Classificação de Resíduos de Serraria e seu Potencial de Utilização**. 2011. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Pampa, São Gabriel, 2011.

CARDOSO, B. M. **Uso da Biomassa como Alternativa Energética**. 2012. 98 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

CARVALHO N. R.; BARROS, J. L.; SILVA, D. A.; NAKASHIMA, G. T.; YAMAJI, F. M. Caracterização física e química da biomassa usada como combustível sólido em uma caldeira. **Quim. Nova**, São Paulo, SP, Vol. 44, n. 1, p. 35-40, 2021

CBIE - Centro Brasileiro de Infraestrutura. **Como a biomassa se transforma em energia elétrica?** Rio de Janeiro, RJ, 2019. Disponível em:<<https://cbie.com.br/como-a-biomassa-se-transforma-em-energia-eletrica/>>. Acesso em: 15 set. 2021.

CHAVES, A. M. B.; VALE, A. T.; MELIDO, R. C. N.; ZOCH, V. P. Características energéticas da madeira e carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp. **Enciclopédia biosfera**, Jandaia, GO, v. 9, n. 17, p. 533-542, 2013.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Safra Brasileira de Cana-de-Açúcar**. Brasília, DF, 2022. Disponível em:<<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>>. Acesso em: 10 set. 2022.

CORRADI, G. M. **Qualidade energética de diferentes biomassas florestais utilizadas no oeste paranaense**. 2021. 47 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2022.

CORREIA, M. A. C.; SEYE, O.; SILVA, A. M. P.; SILVA, R. L. Características e potencial energético do bagaço da cana-de-açúcar armazenado sem cobertura por um período prolongado. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá, PR, v. 13, n.1, p. 173-187, 2020.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. Caracterização da Biomassa. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Editora Unicamp, Campinas, 2008. v. 1, cap. 2, p. 31-62.

COSTA, A. C. L. A.; EUFRADE JUNIOR, H. J.; SPADIM, E. R.; SILVA, J. M. S.; GUERRA, S. P. S. Caracterização física, química e mecânica de pellets de bagaço

de cana-de-açúcar. **Energia na Agricultura**, Botocatu, SP, v. 35, n. 1, p. 38-45, 2020.

COSTA, A. C. S.; OLIVEIRA, A. C.; FREITAS, A. J.; LEAL, C. S.; PEREIRA, B. L. C. Qualidade do carvão vegetal para cocção de alimentos comercializados em Cuiabá-MT. **Nativa**, Mato Grosso, MT, v. 5, n. 6, p. 456-461, 2017.

COSTA, J. S. **Biomassa residual para uso energético no Estado do Pará**. 2018. 66 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, PA, 2018.

DANTAS FILHO, P. L. **Análise de custos na geração de energia com bagaço de cana-de-açúcar**: um estudo de caso em quatro usinas de São Paulo. 2009. 175 f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

DIAS, J. M. S. et. al. **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. Brasília-DF, Embrapa Agroenergia, 2012. 132 p.

DIAS JÚNIOR, A. F.; BRITO, J. O.; ANDRADE, C. R. Granulometric Influence on the Combustion of Charcoal for Barbecue. **Revista árvore**, Viçosa, MG, v.39, n.6, p.1127-1133, 2015.

DIONIZIO, A. F.; VALE, A. T.; MOREIRA, A. C. O.; GALVÃO, L. G. O.; CHAVES, B. S.; COSTA, M. A. Agregação de valor a resíduos agroindustriais para fins energéticos. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, PT, v. 42, n. 2, p. 528-538, 2019.

DUPONT, Capucine et al. "Kinetic modelling of steam gasification of various woody biomass chars: Influence of inorganic elements". **Bioresource Technology**, v. 102, n. 20, 2011, p. 9743–748.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Transferência de Tecnologia Florestal Cultivo de eucalipto em propriedades rurais**: diversificação da produção e renda. Brasília, DF, Embrapa, 2014. 138 p.

EMLURB – Empresa de Limpeza Urbana do Recife. **Relatório do aproveitamento de restos de poda urbana do Recife para o processo de compostagem**. Recife-PE, EMLURB/PCR, 2017. 7 p.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Energia renovável:** Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ, EPE, 2016. 452p.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Covid-19:** Impactos nos mercados de energia no Brasil 1º semestre de 2020. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ, EPE, 2020. 16p.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional (BEM) 2022:** Ano Base 2021. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ, EPE, 2022. 299p.

FAPESP – Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo. **Propriedades do bagaço da cana-de-açúcar.** 30. ed. São Paulo, SP, 1998. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/propriedades-do-bagaco-da-cana-de-acucar/>>. Acesso em: 24 set. 2022.

FERNANDES, D. M. **Biomassa e biogás da suinocultura.** 2012. 211 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

FERREIRA, S. O. P. M.; FERREIRA JÚNIOR, LYRA, M. R. C. C. **Gestão Ambiental:** Diálogos em sustentabilidade. In: OLIVEIRA, M. B. M.; SOUZA, C. C.; LUNA, M. J. M. **Gestão Ambiental:** Diálogos em sustentabilidade. 23. ed. Recife, 2019. cap. 3.5.

FERREIRA, S. O. P. M.; FERREIRA JÚNIOR, J. A. M.; SOUZA, C. C.; LYRA, M. R. C. C. Análise da Coleta Seletiva Solidária na Universidade Federal de Pernambuco, Campus Recife - PE. In: SANTOS, J. P. O.; SILVA, R. C. P.; MELLO, D. P.; EL-DEIR, S. G. **Resíduos sólidos:** Impactos Socioeconômicos e Ambientais. 1. ed. Recife, 2018. v. 1, cap. 4.4, p. 345-357.

FERREIRA, M. C.; SANTOS, R. C.; CASTRO, R. V. O.; CARNEIRO, C. O.; SILVA, G. G. C.; CASTRO, A. F. N. M.; COSTA, S. E. L.; PIMENTA, A. S. Biomass and energy production at short rotation *Eucalyptus* clonal plantations deployed in Rio Grande do Norte. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 41, n. 5, p. 1-7, 2017.

FOELKEL, C. Utilização da biomassa do eucalipto para produção de calor, vapor e eletricidade. In: FOELKEL, C. **Eucalyptus online book.** 1. ed. 2016. v. 1, cap. 44, p. 05-264.

GAMA, D. C.; DO NASCIMENTO JÚNIOR, J. M.; DE DEUS, D. A.. Resíduo madeireiro gerado em marcenarias no município de Ribeira do Pombal–Bahia. **Biodiversidade**, v. 16, n. 3, 2017.

GARCÍA, R.; PIZARRO, C.; LAVIN, A. G.; BUENO, J. L. Biomass proximate analysis using thermogravimetry. **Bioresources Technology**, v. 139, p. 1-4, 2013.

GMACH, F. **Caracterização e predição das propriedades energéticas de *Eucalyptus* spp. através de espectroscopia NIR e VIS**. 2019. 62 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Florestal) – Universidade do Contestado, Marcílio Dias, 2019.

GRILO, M. B. Recomendações e cuidados no uso da energia solar em secadores de frutas. In: SILVA, G. F.; SILVA, D. P.; SILVA, I. P.; SILVA, M. S.; BERY, C. C. S.; FRANÇA, F. R. M. **Energias alternativas: tecnologias sustentáveis para o nordeste brasileiro**. 1. ed. Aracaju, 2019. V. 1, cap. 3, p. 87-93.

GROTTO, C. G. L.; COSTA, A. M. F.; COLARES, C. J. G.; PEREIRA, D. H.. Caracterização da biomassa de bagaço de cana-de-açúcar com vistas energéticas. **ForScience**, v. 9, n. 1, p. e00928-e00928, 2021.

HABITZREITER, T. L.; ADAMI, P. F.; BRUN, E. J.; BATISTA, V. V.; FERREIRA, M. L.; GIACOMEL, C. L. Poder calorífico e análise econômica do uso total ou parcial da biomassa de eucaliptos. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 18, n. 3, p. 282–288, 2019.

HOFFMANN, B. S. **O Ciclo Combinado com Gaseificação Integrada e a Captura de CO₂: Uma Solução para Mitigar as Emissões de CO₂ em Termelétricas a Carvão em Larga Escala no Curto Prazo**. 2010. 128 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - COPPE/ Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2010.

HUANG, C.; HAN, L.; YANG, Z.; LIU, X. Ultimate analysis and heating value prediction of straw by near infrared spectroscopy. **Waste Management**, Pequim, CN, v. 1, n. 29, p. 1793-1797, 2009.

IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório Anual 2022**. 2022. 87 p. Disponível em:<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf?utm_source=akna&utm_medium=email&utm_campaign=Destaque-iba-349-Edicao-25-de-novembro-de-2022>. Acesso em: 31 jan. 2023.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades e Estados: Araripina**. São Paulo, SP, 2021a. Disponível em:<<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pe/araripina.html>>. Acesso em: 31 jan. 2023.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades e Estados: Recife**. São Paulo, SP, 2021b. Disponível em:<<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pe/recife.html>>. Acesso em: 31 jan. 2023.

ISO 17225-2: 2014 – **Solid biofuels** - Fuels specification and classes - Part 2 - Graded pellets. Brussels, 2014.

ISO 1928, “**Solid mineral fuels** - Determination of gross calorific value by the bomb calorimetric method and calculation of net calorific value”, 2009.

JACINTO, R. C. **Produção de pellets para energia usando diferentes resíduos de biomassa agrícolas e florestais**. 2017. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2017.

JAIN, R. K.; SINGH, B. Fuelwood characteristics of selected indigenous tree species from central India. **Bioresource Technology**, Lucknow, IN, v. 68, n. 3, p. 305-308, 1999.

JARA, E. R. P. **O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 1989, 6p. (Comunicação Técnica, 1797).

JUIZO, C. G. F.; LIMA, M. R.; SILVA D. A. Qualidade da casca e da madeira de nove espécies de Eucalipto para produção de carvão vegetal. **Agrária**, v.12, n.3, p.386-390, 2017.

KLOCK, U.; ANDRADE, A. S.; MOURA, G. B.; POTULSKI, D.; BARBOSA, T. F.; MORAES, M. V. **Manual e fichas para práticas de análises químicas quantitativas da madeira**: breu. Curitiba, PR, UFPR, 2013. 13p.

KLOCK, U.; MUÑIZ, G. I. B.; HERNANDEZ, J. Á.; ANDRADE, A. S. **Química da madeira**. Curitiba – PR, Universidade Federal do Paraná, 2005.

LIMA, E. A. Alternativa para estimar o preço da madeira para energia. **Revista Embrapa**, Colombo, PR, v. 1, n. 1, p. 1-4, 2010.

LIZA, T. D.; JULIA, W.; LUIS, G. J.; TEDESCO, F. B. S.; JOSÉ, F. S. Qualidade da biomassa florestal de passivos ambientais utilizada para a geração de energia. Simpósio Sul em Ciências Ambientais. **Anais...** In: I Simpósio Sul em Ciências Ambientais, Lages, v. 20, p. 42-44, 2017.

LOPES, E. D. **Avaliação de clones de *Eucalyptus* spp e *Corymbia* spp em diferentes espaçamentos visando à produção de bioenergia.** 2017. 122 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Biocombustíveis) - Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri e Universidade Federal de Uberlândia, Diamantina, 2017.

MACHADO, G. O.; VOGUEL, F.; SILVA, M. M. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas, químicas e energéticas do carvão de cinamomo (*Melia azedarach* L.). **Ambiência**, v.10, n.1, p.83-96, 2014.

MARTINS, R. **Energia produzida a partir do bagaço da cana é economicamente viável.** Agência USP, São Paulo, SP, 2009. Disponível em:<
https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=energia-produzida-partir-bagaco-cana-economicamente-viavel&id=010175090810#.Y_dkhSbMLIU> Acesso em: 08 nov. 2021.

MAYER, S. L. S. **Dendroenergia de cinco espécies nativas do Níger no Sahel.** 2016. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

MIRANDA, L. N. N. **Quantificação de compostos fenólicos em diferentes compartimentos arbóreos de um híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*.** 2021. 41 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Florestal) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, São João Evangelista, 2021.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. **Biomassa para energia no nordeste: atualidade e perspectivas.** 1 ed. Brasília, DF, MMA, 2018, 161p.

MORAES, S. L.; MASSOLA, C. P.; SACCOCCIO, E. M.; SILVA, D. P.; GUIMARÃES, Y. B. T. Cenário brasileiro da geração e uso de biomassa adensada. **Revista IPT – Tecnologia e Inovação**, São Paulo, SP, v. 1, n. 4, p. 58-73, 2019.

NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T. de P.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; VIEIRA, C. M. M. Avaliação de clones de *Eucalyptus* em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 319–330, 2011.

NEVES, T. A. **Qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de Eucalyptus cultivados no sul de Minas Gerais**. 2012. 94 f. Dissertação (Mestrado em processamento e utilização da madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, 2012.

NOBRE, J. R. C.; CASTRO, J. P.; BIANCHI, M. L.; BORGES, W. M. DA S.; TRUGILHO, P. F.; MOULIN, J. C.; NAPOLI, A. Caracterização do carvão ativado produzido a partir de serragens de maçaranduba. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 107, p. 693-702, 2015.

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; ALMEIDA, W.; PEREIRA, B. L. C. E.; CARDOSO, M. T. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 87, p. 431-439, 2010.

OLIVEIRA, B. M. **Qualidade de pellets de bagaço de cana-de-açúcar e serragem de eucalipto em diferentes composições**. 2016. 52 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.

OLIVEIRA, L. H.; BARBOSA, P. V. G.; LIMA, P. A. F.; YAMAJI, F. M.; SETTE JÚNIOR, C. R. S. Aproveitamento de resíduos madeireiros de *Pinus* sp. com diferentes granulometrias para a produção de briquetes. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, PT, v. 40, n. 3, p. 683-691, 2017.

PACIONI, T. R. **Gaseificação de biochars de bagaço de maçã e de borra de café com CO₂**: estudo cinético. 2013. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

PARIGOT, P. **Relação entre a umidade e o poder calorífico da biomassa utilizada na COCELPA**. 31 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

PAULA, L. E. R.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; BIANCHI, M. L. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **Cerne**, Lavras-MG, v. 17, n. 2, p. 237-246, 2011.

PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. A. Correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. **Fuel**, v. 84, n. 5, p. 487-494, 2005.

PROT, L. E. R.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; BIANCHI, M. L. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **Cerne**, Lavras-MG, v. 17, n. 2, p. 237-246, 2011.

PENTO, G. A. **Geração de vapor na indústria, estudo da viabilidade da substituição de combustíveis fósseis para biomassa, combustível renovável.** 2015. 62 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Centro Universitário do Sul de Minas, Varginha, 2015.

PREFEITURA DO RECIFE. **Caracterização do território.** Recife, PE, 2023. Disponível em: <<https://www2.recife.pe.gov.br/pagina/caracterizacao-do-territorio>> Acesso em: 31 jan. 2023.

PREILLIPER, U. E. M.; DALFOVO, W. C. T.; ZAPPAROLI, I. D.; MAROUBO, L. A.; MAINARDES, E. L. Aproveitamento do resíduo madeireiro na produção de energia termelétrica no município de Marcelândia-MT. **Revista Desenvolvimento e Meio Ambiente**, Curitiba, PR, v. 36, p. 411-428, 2016.

PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, M.; TONOLI, G. H. D.; COUTO, A. M.; TRUGILHO, P. F.; GUIMARÃES JÚNIOR, M. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, PR, v. 31, n. 66, p. 113-122, 2011a.

PROTÁSIO, T. P.; SANTANA, J. D. P.; GUIMARÃES NETO, R. M.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B.; TRUGILHO, P. F.; BISPO, I. B. Avaliação da qualidade do carvão vegetal de *Qualea parviflora*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, PR, v. 31, n. 68, p. 295-307, 2011b.

PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; NEVES, T. A.; VIEIRA, C. M. M. Análise de correlação canônica entre características da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba-SP, v. 40, ed. 95, p. 317-326, 2012.

PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; TONOLI, G. H. D.; GUIMARÃES JÚNIOR, M.; TRUGILHO, P. F.; MENDES, L. M. Brazilian lignocellulosic wastes for bioenergy production: characterization and comparison with fossil fuels. **Bioresources**, Raleigh, v. 8, p. 1166-1185, 2013a.

PROTÁSIO, T. P.; COUTO, A. M.; REIS, A. A.; TRUGILHO, P. F. Seleção de clones de *Eucalyptus* para a produção de carvão vegetal e bioenergia por meio de técnicas univariadas e multivariadas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 97, p. 15-28, 2013b.

PUÑAL, T. S.; NAYA, S.; BERCEIRO, J. L.; SAAVEDRA, T.; ARTIAGA, R. Thermogravimetric analysis of wood, holocellulose and lignina from five wood species. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 109, p. 1163-1167, 2012.

PUROHIT, N.; NAUTIYAL, A. R. Fuelwood value index of indian mountain tree species. **International Tree Crops Journal**, p.177-182, 1987.

RAPOSO, F. L. Q.; MARTINS, V.; SAMPAIO, C. H.; SCHAEFFER, L. Aproveitamento de Biomassa resultante da serragem e painagem da madeira em Moçambique. **Anais...** In: 35 SENAFLOR, Porto Alegre, RS, 2015.

REIS, A. A.; PROTÁSIO, T. de P.; MELO, I. C. N. A.; TRUGILHO, P. F.; CARNEIRO, A. de C. O. Composição da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus urophylla* em diferentes locais de plantio. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, PR, v. 32, n. 71, p. 277-290, 2012.

ROCHA, K. D. **Produtividade volumétrica de clones de Eucalyptus spp. Na região do polo gesseiro do araripe**. 2012. 110 f. Tese (Doutorado em ciências florestais) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2012.

ROMERO T. **Bagaco na construção civil**. Agência de Notícias da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, 2007. Disponível em:<<https://agencia.fapesp.br/bagaco-na-construcao-civil/7211/>>. Acesso em 10. nov. 2021.

SANTOS, G. H. F.; NASCIMENTO, R. S.; ALVES, G. M. Biomassa como energia renovável no Brasil. **Revista Uningá Review**, Maringá, PR, v. 29, n. 2, p. 06–13, 2017.

SANTOS, I. D. **Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica e contração da madeira e nos rendimentos e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado**. 2008. 57 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2008.

SANTOS, P. R.; SANTOS, L. C.; COSTA, A. M. M.; CAVALCANTI, M. L. C. Produção de artefatos a partir do aproveitamento de biomassa residual no semiárido de Pernambuco. **Revista de Empreendedorismo e Inovação Sustentáveis**, Curitiba, PR, v. 5, n. 3, p. 90-103, 2020.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. M.; CASTRO, R. V. O.; BIANCHE, J. J.; SOUZA, M. M. & CARDOSO, M. T. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 90, p. 221-230, 2011.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; CASTRO, R. V. O.; VIDAURRE, G. B.; TRUGILHO, P. F.; CASTRO, A. F. N. M. Influência das propriedades químicas e da relação siringil/guaiacil da madeira de eucalipto na produção de carvão vegetal. **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 657-669, 2016.

SEMITELA, L. C. S. **Viabilidade do uso do bagaço de cana para geração de energia**. 2018. 105 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

SETTE JÚNIOR, C. R.; HANSTED, A. L. S.; NOVAES, E.; LIMA, P. A. F.; RODRIGUES, A. C.; SANTOS, D. R. S.; YAMAJI, F. M. Energy enhancement of the eucalyptus bark by briquete production. **Industrial Crops and Products**, v. 122, p. 209-213, 2018.

SILVA, D. A.; ALMEIDA, V. C.; VIANA, L. C.; KLOCK, U.; MUÑIZ, G. I. B. Avaliação das propriedades energéticas de resíduos de madeiras tropicais com uso da espectroscopia NIR. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, RJ, v. 21, n. 4, p. 561-568, 2014.

SILVA, D. A.; MULLER, B. V.; KUIASKI, E. C.; ELOY, E.; BEHLING, A.; COLAÇO, C. M. Propriedades da madeira de *Eucalyptus benthamii* para produção de energia. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, PR, v. 35, n. 84, p. 481-485, 2015.

SILVA, I. P.; LIMA, R. M. A.; RUZENE, D. S.; SILVA, D. P. Resíduos agroindustriais como biomassa alternativa para geração de energia distribuída em comunidades rurais. In: SILVA, G. F. (Org.) et al. **Energias alternativas: tecnologias sustentáveis para o nordeste brasileiro**. 1. ed. Aracaju, 2019. v. 1, cap. 9. p. 189-211.

SILVA, T. C. **Uso da biomassa de poda urbana da cidade do Recife-PE para geração de energia**. 2018. 110 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2018a.

SILVA, T. C. **Densidade energética da madeira de *Rhizophora mangle***. 2018. 33 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Florestal) – Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2018b.

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

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

SOUZA, F.; VALE, A. T. Densidade energética de briquetes de biomassa lignocelulósica e sua relação com os parâmetros de briquetagem. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, PR, v. 36, n. 88, p. 405-413, 2016.

SOUZA, N. R. D.; ALENCAR, L. S.; MAZZONETTO, A. W. Potencial energético do resíduo das podas de árvores no município de Piracicaba-SP. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, SP, v. 31, n. 3, p. 237-245, 2016.

TAPPI T 264 cm-97. **Preparation of wood for chemical analysis**. Atlanta: Tappi Press, 1997.

TAPPI T 222 om-02, **Acid-insoluble lignin in wood and pulp**. TAPPI, 2002.

TOMELERI, J. O. P.; VALENTIM, L. B.; DA SILVA, J. P.; DE PÁDUA, F. A.; YAMAJI, F. M. Caracterização química e energética de epicarpo residual do pinhão manso (*Jatropha curcas* L.) e briquete produzido. **Revista Virtual de Química**, Niterói, RJ, v. 9, n. 3, p. 942-952, 2017.

TROMBETA, N. C.; FILHO, J. V. C. Potencial e disponibilidade de biomassa de cana-de-açúcar na região centro-sul do Brasil: indicadores agroindustriais. **RESR**, Piracicaba, SP, v. 55, n. 3, p. 479-496, 2017.

TROMBETA, N. C. **Potencial e disponibilidade de biomassa de cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil**: uma aplicação de modelos de localização ótima para fins energéticos Piracicaba. 2015. 149 f. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

VALE, A. T.; BRASIL, M. A. M.; CARVALHO, C. M.; VEIGA, R. A. A. Produção de energia do fuste de *Eucalyptus grandis* hill ex- maiden e *Acacia mangium* willd em diferentes níveis de adubação. **Cerne**, Lavras, MG, v. 6, n. 1, p. 83-88, 2000.

VALE, A. T.; MENDES, R. M.; AMORIM, M. R. S.; DANTAS, V. F. S. Potencial Energético da Biomassa e Carvão Vegetal do Epicarpo e da Torta de Pinhão Manso (*Jatropha curcas*). **Cerne**, Lavras, MG, v. 17, n. 2, p. 267-273, 2011.

VIDAL, M. F. **Desempenho recente do setor sucroalcooleiro Nordestino.** Caderno Setorial ETENE, Ano 4, n. 67, fev. 2019.

VISSOTTO, J. P.; MAZZONETTO, A. W.; NEVES, R. C.; SÁNCHEZ, E. M. S.; SÁNCHEZ, C. G. Caracterização de *Pinus*, *Eucaliptus*, casca de *Eucaliptus* e resíduos florestais e de destoca para fins energéticos. **Anais...** In: VII CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA. São Luís, Maranhão. 2012.

WANG, C.; LIU, Y.; ZHANG, X.; CHE, D. A study on coal properties and combustion characteristics of blended coals in Northwestern China. **Energy & Fuels**, Washington, DC, v. 25, n. 1, p. 3634-3645, 2011

WATZLAWICK, L. F.; WIONZEK, F. B.; SILVA, S. V. K.; BENIN, C. C. Produção de biomassa e propriedades energéticas do *Eucalyptus benthamii* maiden et cambage. In: GONÇALVES, F. G. **Engenharia industrial madeireira: tecnologia, pesquisa e tendências.** Editora Científica, 1. ed. Guarujá, 2020, v. 1, cap. 18, p. 267-285.

YAMAN, S. **Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks.** Energy Conversion and Management, v. 45, n. 5, p. 651-671, 2004.