RENATO RODRIGO MENON DE LIMA

POTENCIAL DA BIOMASSA AGROINDUSTRIAL PARA PRODUÇÃO DE PELLETS

MESTRADO EM BIOENERGIA

GUARAPUAVA-PR

2022

RENATO RODRIGO MENON DE LIMA

POTENCIAL DA BIOMASSA AGROINDUSTRIAL PARA PRODUÇÃO DE PELLETS

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Bioenergia, área de concentração em Biocombustíveis, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Luciano Farinha Watzlawick

Orientador

GUARAPUAVA-PR

2022

Catalogação na Publicação
Rede de Bibliotecas da Unicentro

Lima, Renato Rodrigo Menon
L732p Potencial da biomassa agroindustrial para produção de pellets / Renato Rodrigo Menon de Lima. – – Guarapuava, 2022.
vii, 62 f. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Programa de Pós-Graduação em Bioenergia. Área de Concentração: Biocombustíveis, 2022.

Orientador: Luciano Farinha Watzlawick
Banca examinadora: Raul de Abreu Neto, Edson Perez Guerra

Bibliografia

1. Bioenergia. 2. Biocombustíveis sólidos. 3. Matéria-prima renovável. 4. Resíduos da agroindústria. I. Título. II. Programa de Pós-Graduação em Bioenergia.

CDD 574

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE/UNICENTRO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO – PROPESP
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOENERGIA – PPGB

TERMO DE APROVAÇÃO

RENATO RODRIGO MENON DE LIMA

"Potencial da Biomassa Agroindustrial para Produção de Pellets"

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Bioenergia, área de concentração em Biocombustíveis e Energias Renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 19 de agosto de 2022.

PROF. DR. LUCIANO FARINHA WATZLAWICK
(UNICENTRO)

PROF. DR. RAUL DE ABREU NETO
(Universidade Federal de Lavras-MG)

PROF. DR. EDSON PEREZ GUERRA
(UNICENTRO)

GUARAPUAVA-PR
2022

Dedico este trabalho à
minha família e
aos meus amigos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus que sempre iluminou todo o meu caminho, guiando e protegendo durante toda minha jornada.

Agradeço à minha mãe Ana Lúcia pela formação do meu caráter, amor e carinho. Ao meu pai Dinoel e aos meus irmãos, Gabriel e Daniel, por todo carinho, atenção, apoio moral e aconselhamentos nesta jornada.

Agradeço ao professor Dr. Luciano Farinha Watzlawick pela orientação, por sua paciência e amizade.

Ao professor Dr. Raul de Abreu Neto pela amizade, confiança e inspiração para a produção deste trabalho.

A todos os colaboradores do programa de Pós-graduação em Bioenergia, da área de concentração em Biocombustíveis da Universidade Estadual do Centro-Oeste, pelo ensinamento e oportunidade de crescimento profissional.

A todo o grupo de profissionais do laboratório de Energia da Biomassa Florestal da UFPR por toda ajuda e auxílio necessária para a realização das análises laboratoriais.

Agradeço a todos que fizeram parte, diretamente ou indiretamente, da minha formação pessoal e profissional.

E, finalmente, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado concedida para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS ..... **i**
LISTA DE TABELAS ..... **ii**
LISTA DE EQUAÇÕES ..... **iii**
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS ..... **iv**
RESUMO ..... **vi**
ABSTRACT ..... **vii**
1. INTRODUÇÃO **1**
2. OBJETIVOS **3**
3. REVISÃO DA LITERATURA **4**
3.1. Resíduo agroindustrial ou biomassa como fonte energética? **4**
3.2. Biocombustíveis sólidos e pellets como oportunidade de geração de energia **4**
3.3. Pelletização de resíduos agroindustriais para produção de energia **6**
3.3.1. Teor de umidade *8*
3.3.2. Aglutinante *9*
3.3.3. Temperatura *9*
3.3.4. Secagem de materiais *10*
3.3.5. Análise imediata *10*
3.3.6. Poder calorifico *10*
3.3.7. Resistência mecânica *11*
3.3.8. Densidade aparente e energética *11*
3.4. Cadeia produtiva do gênero Pinus como oportunidade para produção de pellets **11**
3.5. Resíduos de cebola como biomassa energética **13**
3.6. Geração de resíduo de milhos como biomassa de potencial energético **14**
3.7. Resíduos do processamento de cevada como fonte de bioenergia **16**
4. MATERIAIS E MÉTODOS **17**
4.1. Origem dos resíduos **17**
4.2. Teor de umidade dos resíduos **17**
4.3. Trituração dos resíduos **18**

4.4. Formação ou prensagem 19
4.5. Densidade a granel 20
4.6. Determinação do poder calorifico 20
4.7. Análise química imediata 21
4.8. Durabilidade mecânica 23
4.9. Análise estatística 24
4.10. Norma 24
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO 26
5.1. Pellets de biomassa florestal 26
5.2. Pellets de biomassa não-lenhosa 31
6. CONCLUSÕES 36
7. SUGESTÕES DE ESTUDOS FUTUROS 37
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 38
APÊNDICES 50

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Produção e consumo mundial de pellets e a trajetória de exportação..... 5
Figura 2: Fluxograma resumido do processo de pelletização..... 8
Figura 3: Etapa final na esteira do processador de cebola..... 14
Figura 4: Cultivo de milho [A], palha do milho [B] e espigas [C]..... 15
Figura 5: Casca de cebola [A], bagaço de cevada [B], sabugo de milho [C], maravalha de Pinus [D]..... 17
Figura 6: Estufa secando amostra de espiga de milho triturada. 18
Figura 7: Pellets de MP [A], pellets de BC [B], pellets de SM [C], pellets de CC [D]. 19
Figura 8: Pelletizadora laboratorial utilizada para a produção das amostras [A] e conjunto rolete e matriz plana de pelletização [B]. 19
Figura 9: Bomba calorimétrica utilizada para análise do poder calorífico dos pellets... 21
Figura 10: Forno mufla utilizado no presente trabalho. 22
Figura 11: Tambor rotativo para teste de durabilidade mecânica (friabilidade) "modificado". 24
Figura 12: Distribuição dos valores de densidade a granel das amostras de pellets de maravalha de *Pinus*..... 28
Figura 13: Correlação linear entre o teor de umidade e a densidade a granel em função do poder calorífico superior, de acordo com a Equação 6..... 30
Figura 14: Correlação entre poder calorífico, teor de cinzas e teor de materiais voláteis das amostras de pellets de materiais não-lenhosos, de acordo com a Equação 7..... 33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Especificações técnicas das propriedades físico-químicas dos pellets de biomassa florestal para uso industrial. 25
Tabela 2: Especificações técnicas das propriedades físico-químicas dos pellets de biomassa não-lenhosa para uso industrial. 25
Tabela 3: Médias do teor de umidade, densidade a granel, durabilidade mecânica e teor de finos, teor de materiais voláteis, teor de cinzas, carbono fixo e poder calorifico dos pellets de maravalha de *Pinus*, casca de cebola, sabugo de milho e bagaço de cevada..... 26
Tabela 4: Qualidade das amostras de pellets em relação aos parâmetros das normas EN ISO 17225-2 (2014) e a EN ISO 17225-6 (2014). 35

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Teor de umidade (U%). 25
Equação 2: Densidade a granel (kg/m^3). 19
Equação 3: Determinação dos Materiais Voláteis (TMV%). 20
Equação 4: Teor de Cinzas (TC%). 21
Equação 5: Carbono Fixo (CF%). 21
Equação 6: Correlação linear entre o teor de umidade e a densidade a granel em função do poder calorífico superior.....28
Equação 7: Correlação entre poder calorífico, teor de cinzas e teor de materiais voláteis das amostras de pellets de materiais não-lenhosos.....31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIB	Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa. Relatório
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ASTM	*American Society for Testing and Materials*
BEN	Balanço Energético Nacional
CEN	European Committee for Standardization
CF	Carbono fixo
CV	Coeficiente de variação
CZ	Teor de cinzas
DERAL	Departamento de Economia Rural
DIN	*Deutsches Institut Für Normung*
DU	Durabilidade mecânica
EN	Norma Europeia
EPC	*European pellet council*
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GEE	Gases de efeito estufa
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBP	Instituto Brasileiro Pellets, Biomassa e Briquetes
ISSO	*International Organization for Standardization*
MME	Ministério de Minas e Energia
Mpa	Megapascal
MV	Materiais voláteis
NBR	Norma Brasileira
PCA	*Principal Component Analysis*
PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior
PCU	Poder calorífico útil
TC	Teor de cinzas

UFPR	Universidade Federal do Paraná
UNICENTRO	Universidade Estadual do Centro-Oeste

RESUMO

LIMA, Renato Rodrigo Menon de. **Potencial da biomassa agroindustrial para produção de pellets.** 2022. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) – Universidade Estadual do Centro Oeste, UNICENTRO. Guarapuava -PR. 2022.

A pesquisa sobre o potencial de utilização da biomassa residual para produção de biocombustíveis sólidos alternativos pode contribuir para o desenvolvimento da matriz energética de fontes renováveis de um país. O presente trabalho analisou os parâmetros determinados pela norma Europeia ENplus ISO 17225 (2014) visando viabilizar tecnicamente a produção de pellets de resíduos de maravalha de pinus (PMP), casca de cebola (PCC), sabugo de milho (PSM) e bagaço de cevada (PBC). Foi realizada a análise da densidade a granel, poder calorífico superior, teor de cinzas, teor de materiais voláteis, carbono fixo e resistência mecânica dos pellets. Também, foi efetuada análise de variância e correlação estatística dos parâmetros dos pellets produzidos. Foi verificado que há correlação entre o poder calorífico superior, teor de materiais voláteis e teor de cinzas em pellets de materiais não-lenhosos. Os resultados foram comparados com requisitos estabelecidos pela ENplus ISO 17225 (2014). As amostras de PMP, PCC e PBC reprovaram nos requisitos da norma. Porém, a biomassa de resíduos agroindustriais de maravalha de *Pinus*, casca de cebola e bagaço de cevada apresentam potencial para geração de energia e é possível melhorar a qualidade dos pellets produzidos a partir de ajustes na temperatura e pressão no processo de pelletização, resfriamento dos pellets após a densificação do material e adição de compostos aglutinantes à matéria-prima. A amostra de PSM foi aprovada nos requisitos da norma, e conclui-se que o sabugo de milho é uma biomassa potencial importante para o desenvolvimento da bioenergia no Brasil, podendo ser utilizada para a fabricação de pellets para uso industrial com possibilidade de comercialização no mercado exterior.

Palavras-Chave: bioenergia; biocombustíveis sólidos; matéria-prima renovável; resíduos da agroindústria.

ABSTRACT

LIMA, Renato Rodrigo Menon de. **Potential of agro-industrial biomass for pellet production.** 2022. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) – Universidade Estadual do Centro Oeste, UNICENTRO. Guarapuava -PR. 2022.

The research on the potential use of residual biomass for the production of alternative solid biofuels can contribute to the development of a country's energetic matrix from renewable sources. The present work analyzed the parameters determined by the European standard ENplus ISO 17225 (2014) aiming to enable technically the production of pellets from pine wood shavings (PMP), onion husk (PCC), corn cob (PSM) and barley bagasse residues. (PBC). Bulk density, gross heating value, ash content, volatile material content, fixed carbon and mechanical durability of the pellets were analyzed. Also, analysis of variance and statistical correlation of the parameters of the produced pellets were performed. It was found that there is a correlation between the gross heating value, content of volatile materials and ash content in non-woody pellets. The results were compared with requirements established by ENplus ISO 17225 (2014). The samples of PMP, PCC and PBC failed the requirements of the standard. However, biomass of agro-industrial residues of pine wood shavings, onion husks and barley bagasse have potential for energy generation and it is possible to improve the quality of the produced pellets from temperature and pressure adjustments in the pelletization process, pellet cooling after material densification and addition of binder compounds to the raw material. The PSM sample passed the requirements of the standard, and it is concluded that corn cob is an important potential biomass for the development of bioenergy in Brazil and can be used to manufacture pellets for industrial use with the possibility of commercialization in the foreign market.

Key-Words: agro-industry waste; bioenergy; renewable raw material; solid biofuels.

1. INTRODUÇÃO

O uso da biomassa residual como alternativa para substituir os combustíveis fósseis pode propiciar benefícios econômicos e ambientais relacionados à mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE), pois é fonte de energia renovável de baixo custo para a produção de biocombustíveis (NASRIN et al, 2022; SARKER et al, 2021).

A biomassa lignocelulósica é a principal componente de resíduos da produção agrícola, que são constituídos basicamente por bagaço, palha e madeira. Estima-se que a quantidade de resíduos secos de biomassa vegetal oriunda da produção agroindustrial mundial seja equivalente a 140 bilhões de toneladas ao ano, que poderia ser aproveitada para produção de biocombustíveis com valor agregado e, concomitantemente, resultar na remediação de possíveis passivos ambientais (UNEP, 2015; VAZ JÚNIOR, 2020).

Existem alguns problemas intrínsecos à utilização da biomassa como fonte de energia, como, por exemplo, o alto teor de umidade, a forma e tamanho não regulares, e o baixo peso específico do material. Esses fatores podem dificultar o processamento, o transporte e o armazenamento da matéria-prima em sua forma original. Entretanto, tais problemas podem ser resolvidos a partir da densificação da biomassa para a produção de pellets (KARKANIA; FANARA; ZABANIOTOU, 2012).

A pelletização é um método tecnológico disponível comercialmente que serve para densificar a biomassa através da compressão e aglomeração de partículas, promovidos por aumento de pressão e temperatura. A aplicação desse método resulta em biocombustível sólido conhecido por pellets, com conteúdo energético similar aos combustíveis fósseis convencionais. Os pellets apresentam estrutura cilíndrica com dimensões de aproximadamente 68 mm de diâmetro e 612 mm de comprimento e podem ser utilizados em residências, em indústrias em geral e usinas de produção de energia elétrica, que são capazes de queimar pellets produzidos com diferentes tipos de biomassa sem apresentar dificuldades (EMBRAPA, 2012a; GARCÍA et al, 2019; IRENA, 2019).

Os pellets de madeira estão dentre as principais *commodities* de bioenergia no mercado internacional (IRENA, 2022). Todavia, a fabricação de pellets pode ser realizada através da utilização de diversas matérias-primas orgânicas, como, por exemplo, resíduos da indústria madeireira e seus coprodutos, resíduos agrícolas, culturas energéticas e produtos residuais da indústria alimentícia (GARCÍA et al, 2019).

A pelletização da biomassa apresenta vantagens como (TUMULURU et al, 2011): (i) eficiência de manuseio e transporte no sistema de alimentação e abastecimento da indústria; (ii) controle sobre a uniformidade e densidade de matéria-prima; (iii) material com melhor qualidade de composição; e, (iv) material em conformidade com as especificações de abastecimento da tecnologia de conversão energética.

As especificações relacionadas aos pellets são constituídas sobre os critérios de sustentabilidade estabelecidos pela União Europeia, dado que a Europa é o maior importador mundial desses biocombustíveis sólidos (IRENA, 2022).

A principal razão para a utilização de pellets é relacionada às reduções do consumo de energia fóssil e da emissão de GEE. Logo, análises e investigações sobre tecnologias para alcançar esses objetivos são relevantes (WILD e VISSER, 2018). Porém, existem poucos registros na literatura sobre características de pellets produzidos a partir de resíduos de cebola e bagaço de cevada, ou de subprodutos desse ramo da agroindústria.

Portanto, dada a necessidade global pelo desenvolvimento de fontes de energia renováveis e considerando a oportunidade de aproveitamento de resíduos agroindustriais, este estudo visa analisar a potencialidade da biomassa residual oriunda do processamento de cebola, milho, cevada e *Pinus* como alternativa de matérias-primas para a produção de pellets.

2. OBJETIVOS

O presente estudo teve, como objetivo central, produzir e avaliar a qualidade dos pellets obtidos a partir de resíduos de origem agroindustriais: maravalha de *Pinus*, casca de cebola, sabugo de milho e bagaço de cevada.

Objetivos específicos:

- Analisar o potencial da biomassa de resíduos agroindustriais de *Pinus*, casca de cebola, sabugo de milho e bagaço de cevada para a produção de pellets;
- Comparar os parâmetros dos pellets produzidos com as especificações da norma internacional para uso industrial de biocombustíveis sólidos, ENplus ISO 17225 (2014).

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. Resíduo agroindustrial ou biomassa como fonte energética?

Bioenergia é caracterizada pela produção de energia através de transformações físico-química de produtos sólidos, líquidos e gasosos oriundos da biomassa (IEA e FAO, 2017). A biomassa é constituída por matéria orgânica não-fóssil, de origem animal ou vegetal, com energia química armazenada e é um material renovável considerado como carbono neutro, uma vez que as emissões de gás carbônico (CO_2) resultantes da combustão são absorvidos da atmosfera durante o crescimento da biomassa (BRASIL, 2020a; GARCÍA et al, 2019).

A biomassa pode ser cultivada de maneira sustentável ou obtida a partir de resíduos. A biomassa residual é um subproduto da produção agrícola passível de utilização como matéria-prima potencial para fabricação de diversos produtos, como combustível, polímeros e produtos para construção civil (BENNETT, 2022; TRIPATHI et al, 2019).

Os resíduos eram vistos como um problema em qualquer setor produtivo, mas no final do século XX houve o desenvolvimento da conscientização ecológica e, concomitantemente, da importância sobre o aproveitamento de resíduos gerados no processamento de indústrias (COSTA FILHO et al, 2017). A Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) do Brasil incentiva o desenvolvimento de sistemas de gestão relacionados ao reaproveitamento de resíduos, inclusive para uso energético (BRASIL, 2010).

3.2. Biocombustíveis sólidos e pellets como oportunidade de geração de energia

A biomassa é a fonte de energia renovável mais utilizada no mundo para geração de calor, e pode ser armazenada em larga escala de maneira economicamente mais barata a partir da produção de biocombustíveis. Dessa forma, a biomassa pode fornecer calor em altas temperaturas sem necessidade realizar despesas adicionais com novas tecnologias de conversão de energia (BENNETT, 2022). No Brasil, o aproveitamento energético da biomassa em 2018 representou participação de 23% no setor de transportes e 8,5% no setor de energia elétrica (BRASIL, 2020b).

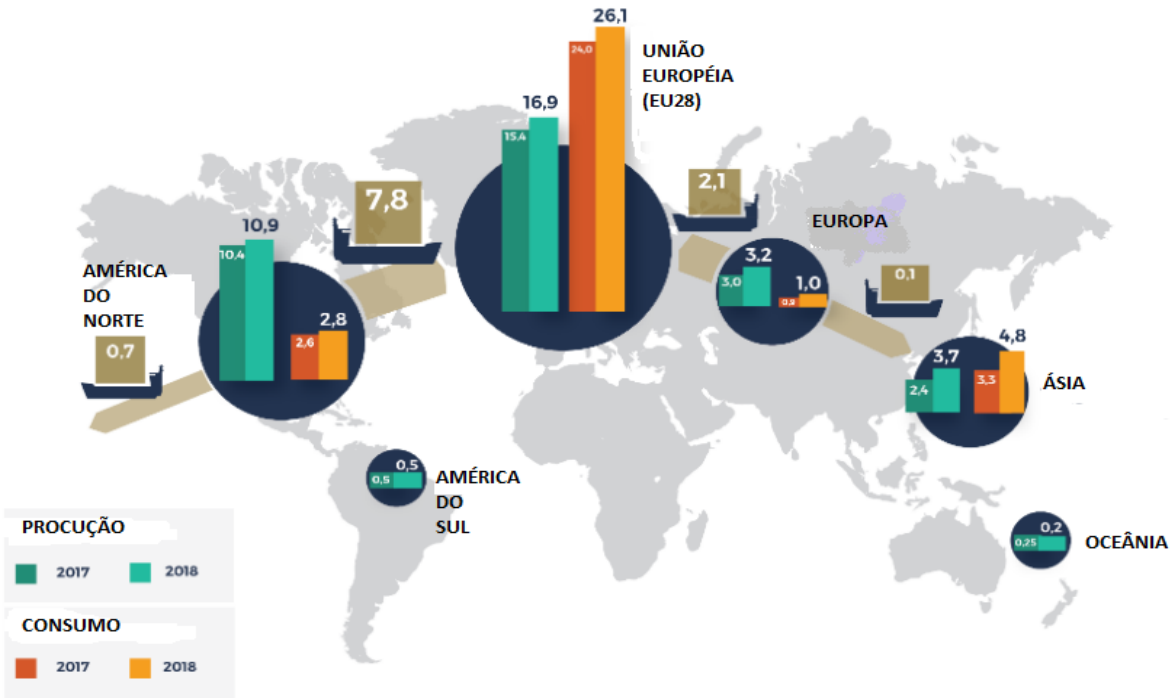
A biomassa sólida utilizada para o aproveitamento energético apresenta vantagens de custo e benefício, tanto por parte do transporte da matéria-prima, quanto pela produção do biocombustível, armazenamento e no transporte para seu uso final (MALICO et al, 2019). A

necessidade de obtenção de energia térmica, utilizando biomassa industrial em geral, de origem renovável e que apresenta combustão com pouca fumaça, com menor liberação de monóxido e dióxido de carbono em relação a qualquer combustível fóssil levou à criação e produção de grande escala pelo mundo do aglomerado combustível cilíndrico chamado de pellet (ABIB e IBP, 2019).

Os maiores produtores de pellets do mundo são a Europa e a Ásia. Em 2018, o consumo mundial de pellets de madeira foi de 52.746.706 toneladas. No mesmo ano, foram produzidas na Europa 20,1 milhões de toneladas de pellets, e teve um consumo de cerca de 27,4 milhões de toneladas, apresentando crescimento de 8% em 2018 em comparação a 2017; 60, 5% do consumo total foi para a geração na forma de calor, e o restante, 39,5%, para a produção de energia elétrica (EPC, 2022).

A Figura 1 demonstra a fabricação e consumo de pellets no mundo, e compara os anos de 2017 e de 2018, tendo a Europa como líder de mercado, tanto na produção quanto no consumo, e a Ásia que apresenta crescimento acelerado, especialmente o país da China.

Figura 1: Produção e consumo mundial de pellets e a trajetória de exportação.



O Instituto Brasileiro Pellets, Biomassa e Briquetes (IBP) é uma entidade Brasileira sem fins lucrativos que visa a defesa do meio ambiente sustentado com o uso da biomassa, pellets e briquetes, e representa indústrias produtoras desde 2015, acompanha toda cadeia de atividade, e engloba, inclusive, indústrias de equipamentos, com foco na melhoria do ambiente regulatório, na propagação de informação da indústria e no desenvolvimento técnico.

Em 2012 a produção efetiva de pellets nacional era de 60.000 toneladas por ano, com produtividade crescente de 35% ao ano (ABIB e IBP, 2019). Entre 2018 e 2019, a produção mundial de pellets apresentou crescimento de 12%. Em 2019, o Brasil foi responsável pela produção de aproximadamente 850 mil toneladas de pellets (GAUTHIER et al, 2020). Caso o Brasil estivesse entre os 5 maiores produtores de pellets do mundo no ano de 2020, a cadeia produtiva poderia gerar mais de 75.000 novos empregos, e movimentar 1,8 bilhões de reais (ABIB e IBP, 2019).

A mudança na legislação foi um dos principais fatores que levou à aceleração do crescimento na produção e uso de biocombustíveis sólidos em países europeus, que incentivou a aplicabilidade da energia renovável, motivado pela oscilação do preço do petróleo (TRØMBORG et al, 2013). Este rápido crescimento só foi possível via redução dos custos de produção e de transporte, incluindo homogeneidade dos produtos, alta valor de aquecimento e alta densidade aparente e estabilidade na taxa de câmbio (LAMERS et al, 2012).

O governo brasileiro instituiu a Política Nacional dos Biocombustíveis (RenovaBio) para promover a eficiência energética e a redução das emissões de GEE em relação a produção, comercialização e utilização de biocombustíveis (BRASIL, 2017). Entretanto, a RenovaBio não apresenta normativas para incentivo de biocombustíveis sólidos, tais como os pellets, o que dificulta o acesso de produtores a novas oportunidades de negócio no mercado nacional.

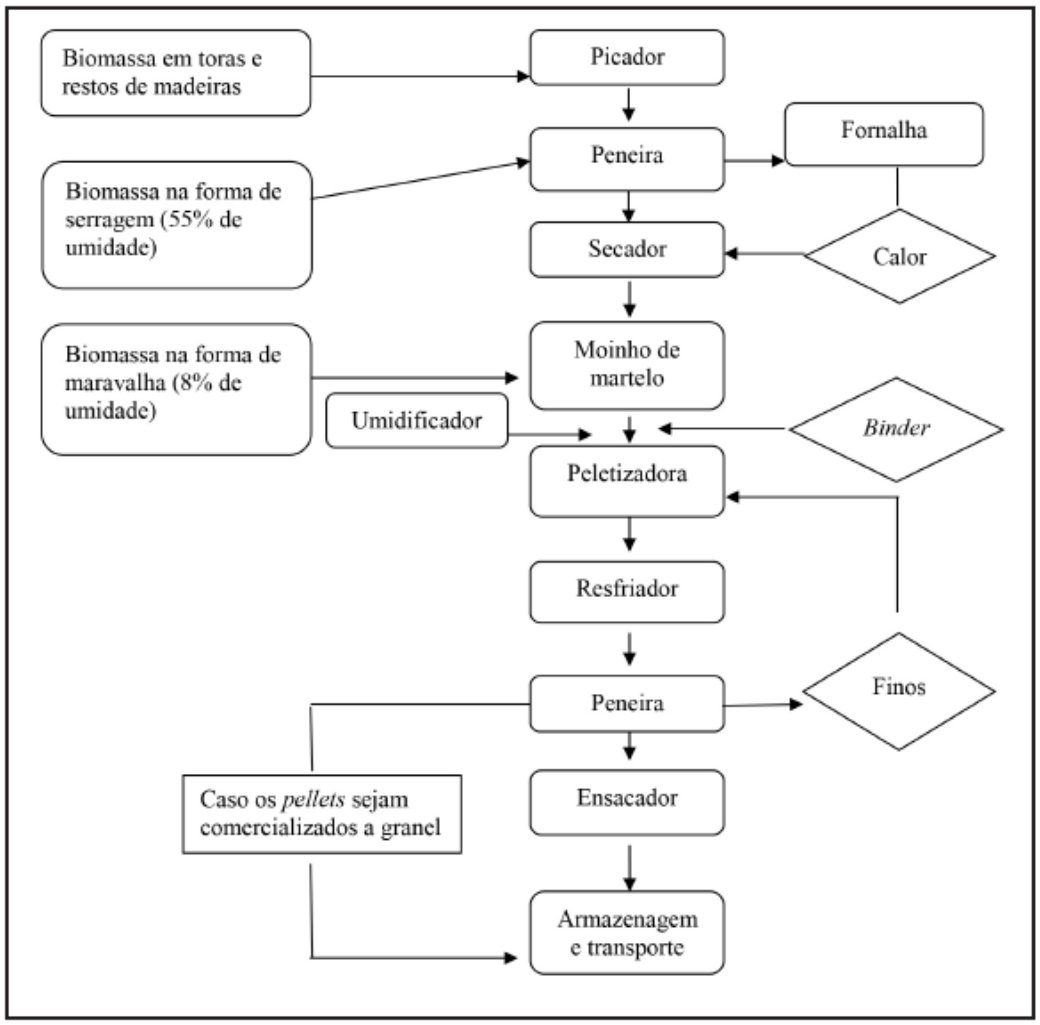
3.3. Pelletização de resíduos agroindustriais para produção de energia

Com o aumento da procura deste tipo de combustível sólido e da crescente demanda no comercio mundial, foram criadas normas específicas para sua produção, como exemplo, Estados Unidos da América (ASTM), Suécia (SS 187.1200), a Áustria (ÖNORM M 7135), e a Alemanha (DIN 51731) (QUÉNO et al, 2019). Estas normas foram criadas para atestar a quantidade deste produto e a qualidade energética expressada pelo tipo de material, sendo garantida por laudos de qualidade, pelas padronizações das propriedades físicas, mecânicas e

energéticas do material, dependendo do tipo de norma a ser seguida (SPANHOL et al, 2015). Existem algumas certificadoras de pellets que garantem a qualidade do produto e da matéria-prima de origem, e são reconhecidas mundialmente. Uma em especial, é a EN*plus*, que atua em países europeus e de responsabilidade da European Pellet Council (EPC), projetada em 2010 pela Deutsches Pelletinstitut GmbH, e criada para conceder as empresas produtoras um certificado dependendo da classe de qualidade, levando em consideração a ISO 17225-2, que são denominadas "EN*plus* A1", "EN*plus* A2" e "EN*plu*s B" (EPC, 2015).

A pelletização (Figura 2) de resíduos florestais e agroindustriais é a denominação do processo de compactação mecânica de coprodutos para gerar um produto a partir do aumento da densidade (em kg/m³) e da densidade energética (em kcal / m³), aliado à e redução da umidade, em comparação com as características das matérias-primas originais, e, portanto, pode resultar em benefícios sobre o armazenamento e transporte do produto (ABIB e IBP, 2019; EMBRAPA, 2012a).

Figura 2: Fluxograma resumido do processo de pelletização.



Fonte: Quéno et al (2019).

A compactação mecânica dá origem ao estágio plástico de deformação. Porém, para o sucesso desse processo, deve-se considerar o tipo da matéria-prima, que tem características diferentes sobre efeito da compactação (MANI; TABIL; SOKHANSANJ, 2004). Densidade, teor de umidade, poder calorífico, aglutinante e temperatura são características que devem ser consideradas para a produção de pellets (EMBRAPA, 2012a; QUIRINO et al, 2005; VAN DAM et al, 2004).

3.3.1. Teor de umidade

O teor de umidade é um parâmetro importante para o processo de pelletização, visto que reduz o atrito durante a prensagem e atua na ligação do material a ser pelletilizado. O teor de

umidade traz benefícios à durabilidade mecânica e ao teor de finos resultantes de impactos durante o transporte. A faixa de teor umidade entre 11% e 13% é ideal de pellets de composição lignocelulósica, que devem apresentar superfície lisa e rígida (SAMUELSSON et al, 2012).

A umidade atua como um plastificante da biomassa visto que influencia na temperatura de transição vítrea da lignina, que se torna um componente ativo no processo de densificação da biomassa quanto maior for a temperatura de transição vítrea (TUMULURU, 2018). Também, a umidade ajuda a promover aumento do contato entre as partículas através da atuação das forças de van der Waals (TUMULURU et al, 2011).

Os pellets devem apresentar teor de umidade de até 15% visto que valores maiores reduzem o poder calorífico de combustão, a temperatura da câmera de combustão e a temperatura dos gases de escape. A umidade em excesso pode provocar explosões devido à formação de vapor, mas a matéria-prima muito seca dificulta os mecanismos de ligação entre as partículas. Porém, teor de umidade abaixo de 5% pode comprometer a durabilidade do material, favorecendo a formação de finos durante o transporte e armazenamento (EMBRAPA, 2012a; GONÇALVES et al, 2009).

3.3.2. Aglutinante

O aglutinante é resultado da compactação da biomassa lignocelulósica sob alta pressão e temperatura, onde a lignina amolece e atua como cola. No caso de materiais com baixa concentração de lignina pode-se utilizar produtos sintéticos, por exemplo o amido (VAN DAM et al, 2004). Existem mais de cinquenta aglutinantes de derivados orgânicos e inorgânicos. Os mais usados no Brasil são: o amido de milho, alcatrão vegetal, féculas de mandioca e melaço de cana-de-açúcar (EMBRAPA, 2012a).

Os produtos sintéticos que são introduzidos para melhorar a liga na formulação de alguns tipos de pellets são chamados de aditivos. A concentração máxima permitida para a comercialização é de 2% do total da massa dos pellets produzidos, a fim de evitar problemas relacionado ao aquecimento das máquinas, riscos à saúde ou ao meio ambiente (EPC, 2015).

3.3.3. Temperatura

Temperatura é responsável pela platicização e deformação das partículas

termoplásticas, que formam a estrutura dos pellets (TUMULURU, 2018). A temperatura tem grande importância no momento da compactação dos pellets, podendo ser capaz de auxiliar na formação de um produto final mais homogêneo, levando em consideração que a temperatura não exceda os 220°C, dependendo do tipo de material a ser prensado, do tempo e teor de água. (EMBRAPA, 2012a)

3.3.4. Secagem de materiais

A secagem preliminar da biomassa é muito importante para a geração de energia térmica por combustão direta em caldeiras ou para o processo de pelletização (MARAFON et al, 2017). A umidade em materiais orgânicos reduz o poder calorífico, rendimento de carbonização e implica em aumento de custos no transporte (SWITHENBANK et al, 2011; ZANUNCIO et al, 2013; ZHU et al, 2011).

A secagem da biomassa também agrega benefícios ao material relacionados à facilidade de trabalhabilidade em geral e à redução do risco de ataque de agentes xilófagos (BATISTA et al., 2015).

3.3.5. Análise imediata

A análise imediata tem objetivo de determinar a composição em forma de porcentual das amostras de combustíveis o teor de umidade, matéria volátil, carbono fixo e cinzas. Geralmente, madeiras apresentam quantidades baixas de teor de cinzas. Os registros de valores maiores deste teor são na maioria das vezes por conta das cascas, resíduos de grão de frutas e palhas de gramíneas (OBERNBERGER; BRUNNER; BÄRNTHALER, 2006).

Os principais componentes orgânicos dos biocombustíveis sólidos são o carbono (C), hidrogênio (H) e Oxigênio (O), sendo que, combustíveis que apresentarem menor valor de teor de cinzas são mais aceitos **(**OBERNBERGER; BRUNNER; BÄRNTHALER, 2006).

3.3.6. Poder calorifico

O poder calorífico é a quantidade de energia na forma de calor liberada pela combustão de uma unidade de massa do material, sendo classificado entre poder calorífico superior e inferior. O poder calorífico superior (PCS) é aquele em que a combustão se efetua a volume

constante e no qual a água formada durante a combustão é condensada e o calor que é derivado desta condensação é recuperado, e o calor calorífico inferior (PCI) é relativo à energia disponível por unidade de massa sem considerar as perdas devido à evaporação de água do combustível (EMBRAPA, 2012a).

3.3.7. Resistência mecânica

De acordo com a norma europeia EN 15103, a durabilidade é calculada pela resistência mecânica dos combustíveis sólidos expostos a contatos leves ou pancadas físicas (CEN, 2005b).

A resistência mecânica dos matérias é um requisito que está vinculado a capacidade física de um biocombustível sólido, e tem a tendência de ocorrer processos de cisalhamento, levando a formação de partículas finas, durante a fase de manipulação, transporte e estocagem (EMBRAPA, 2012a).

3.3.8. Densidade aparente e energética

A densidade a granel aponta a comparação dentre a compactação de dois materiais. Um exemplo dado pela norma do Comité Europeu de Normatização, CEN 15103:2005, sobre a determinação da densidade aparente, é que a diferença entre pellets de madeira de pinus que está 3,69 vezes mais compactado do que a sua serragem ou sua forma original (CEN, 2005a).

A densidade a granel deve ser tratada com grande importância, pois determina o espaço útil a ser ocupado pelos pellets seja no transporte quando no armazenamento. (BRITO, 1982).

Em um caso específico como a matéria-prima florestal, são utilizados qualquer tipo de "resíduo" neste setor, maravalha, serragem, costaneira e outros, que, por sua vez, deve ser triturado e/ou moído, para então ser compactado, considerando que para se obtenha um metro cúbico (1 m^3) de pellets de madeira, precisamos de seis a oito metros cúbicos (6 a 8m^3) de cavaco ou serragem, ou, considerando que a cada uma tonelada (1t) de pellets produzidos que equivale a um metro cubico e meio (1,5 m^3) de volume (ABIB e IBP, 2019; QUÉNO et al, 2019).

3.4. Cadeia produtiva do gênero *Pinus* como oportunidade para produção de pellets

O mundo sempre foi marcado pelos seus registros de exploração de madeira, sendo uma das mais conhecidas formas de degradação e destruição da floresta. No Brasil este registro de exploração sempre foi muito presente, sendo iniciada a partir do descobrimento e colonização do país, servindo de forte fonte de matéria-prima por anos para países de primeiro mundo, levando a uma descontrolada retirada da madeira e destruição do meio ambiente, e assim, prejudicando a fauna e a flora.

Segundo Marto (2009), o plantio do gênero pinus levou a uma supressão da retirada das florestas nativas, por apresentarem requisitos para o abastecimento fundamental para a sustentação do parque industrial madeireiro, visto que a região Sul e Sudeste do Brasil são as que mais se destacam, sendo as espécies mais plantados e industrializados, são, o *Pinus elliotti* e *Pinus taeda,* devido às condições edafoclimáticas do país.

O surgimento de plantações das espécies do gênero Pinus no Brasil teve início no processo do programa de incentivo fiscal durante a década de 1970 e 1980, aumentando a oferta de madeira e diminuição da retirada de florestas nativa, mais apenas na década de 1990 que sua consolidação no mercado financeiro iniciaram o desenvolvimento e abastecimento de indústrias madeireiras (SHIMIZU, 2008).

A área total de árvores plantadas no Brasil totalizou 9,0 milhões de hectares. Somente em 2019, a área ocupada por *Pinus* no país foi de 1,64 milhão de hectares, concentrando 87% da produção nos Estados da região Sul, sendo o Paraná o líder de produção, e o restante (13%) em Minas Gerais, São Paulo e Mato Grosso do Sul (IBÁ, 2020).

Em 2019, cerca de 67% dos resíduos de fábricas da área florestal foram destinados à geração de energia, 12% a reutilização à matéria-prima para outros setores industriais, 7,5% foi mantido no campo para proteção e adubação do solo, 4,2% encaminhado para aterros, e 3,4% para reciclagem (IBÁ, 2020).

O Brasil tem grande potencial para produção de pellets a partir de resíduos em polos de indústrias madeireiras e agroindustriais, porém há muito pouco aproveitamento. Este é um ponto chave visando a oportunidade do mercado, e está ligado à realização de pesquisas especificas (QUÉNO et al, 2019).

3.5. Resíduos de cebola como biomassa energética

A cebola, pertencente ao gênero *Allium*, está entre as hortaliças de maior importância econômica cultivada no Brasil e pode ser encontrada em todas as regiões do país. A *Allium cepa* L. é caracterizada pela formação de bulbos, e é originária do Oriente Próximo é a mais importante quanto ao volume de produção e valor econômico. Devido às grandes mudanças climáticas observadas nas diferentes regiões produtoras, a colheita da cebola tem ciclo cultural diferente em cada região. No Brasil, a cebola é a hortaliça comercial mais importante em termos de rendimento, junto com a batata e o tomate (EMBRAPA, 2002; EMBRAPA, 2007).

De acordo com Departamento de Economia Rural (PARANÁ, 2020), a produção mundial de cebola em 2018 foi de 97 milhões de toneladas. Cerca de 144 países cultivam bulbos e abastecem o mercado mundial, e o Brasil foi o 16° maior produtor mundial, com uma produção estimada de 1,5 milhões de toneladas, cerca de 2% da produção global total.

Os bulbos da cultura são coletados e destinados à galpões com circulações de ar natural, onde podem permanecer por até seis meses (EMBRAPA, 2002). A casca da cebola é o principal resíduo do processamento da cebola na indústria (Figura 3), e apresenta alto teor de compostos com propriedade antioxidantes, principalmente polifenóis, que representa de 2 a 10g por kg de casca de cebola, dependendo das condições fornecidas no cultivo da espécie. (PIECHOWIAK et al, 2020).

Figura 3: Etapa final na esteira do processador de cebola.

Fonte: O autor (2022).

A produção brasileira de cebola em 2019 foi estimada em 1.556.885 toneladas, com rendimento médio de 32.337 kg por hectare. Os maiores Estados produtores são Santa Catarina, Bahia, Minas Gerais, São Paulo, Goiás, Rio Grande do Sul e Paraná, que respondem juntos por cerca de 94% do total nacional (IBGE, 2022).

Os países europeus buscam desenvolver alternativas para a valorização dos resíduos de cebola, que correspondem a cerca de 20% da produção total, ou 450.000 toneladas de resíduos anualmente, representados por cebolas danificadas, fora do padrão de qualidade para comercialização (GONZÁLEZ-SÁIZ et al, 2008).

3.6. Geração de resíduo de milhos como biomassa de potencial energético

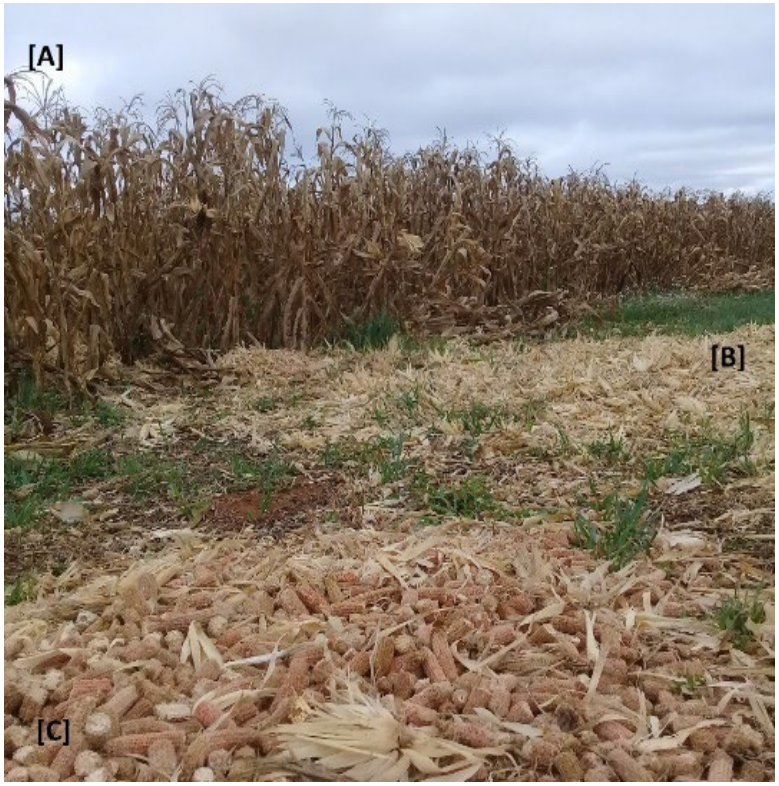
O milho (*Zea mays* L.*)* é uma espécie que pertence à família Gramínea/Poaceae e há mais de 8.000 anos que este cereal é cultivado em várias regiões do mundo. É empregado na alimentação humana e animais, contendo diversos aminoácidos conhecidos, e apresentando enorme potencialidade de produção industrial (BARROS e CALADO, 2014).

A cultura do milho tem grande relevância econômica, com diferentes formas de utilização. O grão individual pode chegar a 250 a 300mg, é formado por 72% de amido, 9,5% de proteínas, 9% de fibras e 4% de óleo. Apenas 15% de toda a produção mundial é destinada para consumo humano, e entre 70% a 85% da produção é destinada a alimentação animal (PAES, 2006). O total de área plantada de cultura do milho no Brasil em 2019 corresponde a

17.776.669 ha, e área colhida de 17.518.054 ha, produzindo 101.138.617 toneladas de milho, com produtividade de 5.773 kg/ha (IBGE, 2019).

Os processos produtivos da indústria do milho geram resíduos (Figura 4). No campo, o cultivo de milho gera como resíduos caules e folhas (palha do milho); estima-se que a cada uma tonelada de grão de milho colhido é gerado entre 2,2 e 2,7 toneladas desses resíduos no campo. Na indústria, os resíduos formados são os sabugos; estima-se que a cada uma tonelada de milho colhido, geram-se de 0,3 a 0,9 toneladas de sabugos (EMBRAPA, 2012a).

Figura 4: Cultivo de milho [A], palha do milho [B] e espigas [C].



Fonte: O autor (2022).

Há Estados brasileiros que podem realizar duas colheitas ao ano, a 1ª safra ou safra de verão, e a 2ª safra ou safrinha. A produtividade entre as regiões é variável, apresentando maiores valores no Sul, Sudeste e Centro-Oeste. Em tais regiões, necessariamente, 50% dos resíduos da produção permanecem no campo para efetivar a ciclagem de nutrientes e matérias orgânicas do solo, mas, os outros 50% podem ser utilizados para geração de energia (EMBRAPA, 2012a).

3.7. Resíduos do processamento de cevada como fonte de bioenergia

A cevada *(Hordeum vulgare* L.*)* tem sua ocorrência natural no Oriente Médio, é o quinto cereal mais relevante economicamente em nível mundialmente, sendo utilizado na fabricação de alimentos para pessoas e animais (EMBRAPA, 2012b).

No Brasil, a importância da cevada só teve início a partir de 1930 para a fabricação de cerveja, isto que, a cultura já tinha sido introduzida pelos colonizadores no século XVI. Atualmente, a produção é quase exclusivamente para industrias de malte, ficando uma pequena parte para alimentação humana e outros usos (MINELLA, 1999).

Uma das características que envolvem esta cultura é a tolerância ao frio, podendo ser uma ótima escolha para plantio de inverno. É produzida em grandes escalas nas regiões do Sul do país, e é a cultura de inverno mais precoce em desenvolvimento de todos os cereais (EMBRAPA, 2001). Em 2019, o Brasil produziu 409.099 toneladas de cevada em uma área plantada de 113.952 ha, e área colhida de 113.814 ha, apresentando rendimento médio de 3.594 kg/ha (IBGE, 2019).

O resíduo decorrente da produção da fabricação de cerveja é chamado de bagaço de cevada, que é retirado do mosto via filtro-prensa, e se apresenta na forma de casca ou farelo, com teor de umidade de aproximadamente 80%, é composto por 25% de proteína, 20% de fibras e índice de nutrientes digestivos de 74% (FREITAS, 2006). Estima-se que há mais de 2.000 mil toneladas/ano de bagaço de cevada no Brasil. A palha da cevada pode ser utilizada para produção de pellets apresenta poder calorífico superior de 3.881 kcal/kg (DOMALSKI et al, 1986; EMBRAPA, 2012b).

O bagaço de cevada, composto por farelos e cascas com teor umidade ao redor de 80%, é um dos resíduos resultantes do processo de produção de cervejas que é retirado do mosto através de filtro prensa (EMBRAPA, 2012b).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Origem dos resíduos

Foram utilizados diferentes tipos de matéria-prima (Figura 5): (i) maravalha de *Pinus* (MP); (ii) casca de cebola (CC); (iii) sabugo de milho (SM); e (iv) bagaço de cevada (BC). Empresas agroindústrias distintas atenciosamente auxiliaram no fornecimento da biomassa e de informações para realização deste estudo. Os materiais foram coletados em diferentes regiões na cidade de Guarapuava/PR. Foram coletados 200kg de cada material para a formação de cada tipo de pellets.

Figura 5: Casca de cebola [A], bagaço de cevada [B], sabugo de milho [C], maravalha de Pinus [D].

Fonte: O autor (2022).

4.2. Teor de umidade dos resíduos

A determinação do teor de umidade dos resíduos utilizados produção de pellets seguiu os princípios da norma EN 14774-2 (EN, 2009), onde o teor umidade é obtida a partir da diferença de peso da amostra antes e após a secagem a 105 ± 2°C. O método de secagem foi realizado para todos os resíduos utilizando estufa (Figura 6), regulada para 105ºC, no laboratório de ciências florestais e forrageiras da Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO), em Guarapuava – PR. A massa inicial dos resíduos foi medida utilizando balança de precisão, logo após a retirada desses da fábrica. A massa dos resíduos submetidos a

secagem em estufa foi mensurada várias vezes no intervalo de hora em hora, até o momento que atingiu massa constante. O teor de umidade ($U_{(\%)}$) foi determinado pela Equação 1.

$$U_{(\%)} = \frac{(m_i - m_s)}{m_s} * 100 \qquad \text{Eq. 1}$$

Onde:$U_{(\%)}$: teor de umidade (%); m_i: massa inicial da amostra (g); m_s: massa seca da amostra (g).

Figura 6: Estufa secando amostra de espiga de milho triturada.

4.3. Trituração dos resíduos

As amostras das biomassas foram trituradas separadamente no laboratório da UNICENTRO, em Irati – PR, com auxílio de um moinho de facas Willey SL 31 Solab (rotação 1750 rpm; potência 736 W), com peneira de abertura de 5,0 mm para obter pellets uniformes com melhor compactação e qualidade. Apenas o material de BC não participou desta parte da moagem, por apresentar em sua formação uma granulometria reduzida.

4.4. Formação ou prensagem

O teor de umidade das partículas de biomassa antes da pelletização foi ajustada para 12 ± 2%. Os pellets (Figura 7) foram produzidos no laboratório da UNICENTRO, em Irati - PR, utilizando uma prensa pelletizadora laboratorial com matriz plana da marca Amandus Kahl, modelo 14-175, com potência de 3,0 kW, capacidade para produção de 30 $kg.h^{-1}$ e diâmetro da matriz de 6 mm (Figura 8). A temperatura de pelletização ficou variou inicialmente de 30 ºC até 90ºC, ao final do processo. A velocidade de rotação dos roletes foi de 1200 rpm.

Figura 7: Pellets de MP [A], pellets de BC [B], pellets de SM [C], pellets de CC [D].

Figura 8: Pelletizadora laboratorial utilizada para a produção das amostras [A] e conjunto rolete e matriz plana de pelletização [B].

4.5. Densidade a granel

Os ensaios da densidade a granel foram realizados no Laboratório da Universidade Federal do Paraná (UFPR), em Curitiba – PR, utilizando a metodologia estabelecida pela norma DIN EN 15103 Biocombustíveis sólidos - Determinação da densidade a granel (DIN, 2010).

A determinação da densidade aparente (a granel) foi realizada a partir da adaptação das normas NBR 6922 (ABNT, 1981) e EN 15103 (CEN, 2005a), onde se utilizou um Becker cilíndrico de volume conhecido de 0,001 m^3, o qual foi preenchido até a borda com o biocombustível sólido, e com o auxílio de uma balança de precisão de 0,1g obteve-se a massa, com variação admitida entre as repetições de 2%. Nesse caso, a densidade também foi obtida através da razão entre a massa e o volume. Ambas as densidades foram obtidas no teor de umidade determinado nos pellets conforme descrição abaixo.

A densidade a granel para a biomassa de formato original e dos pellets produzidos foram determinadas utilizando uma proveta graduada de vidro de 1000ml com base em polipropileno. A massa de pellets ao teor de umidade de equilíbrio necessária para completar o recipiente foi pesada e (Equação 1) Densidade a granel (D_a) foi obtida pela razão entre a massa de pellets pelo volume do Becker.

$$D_a = \frac{m}{V} \qquad \text{Eq. 2}$$

Onde: D_a: densidade a granel (kg/m^3); m: massa de biomassa/pellets (kg); V: volume do Becker (m^3).

A densidade a granel fornece o grau de compactação de um material em relação a outro. Por exemplo, podemos dizer que os pellets “P1” estão 3,69 vezes mais compactados do que a serragem (647,4/175,5 = 3,69).

4.6. Determinação do poder calorifico

A análise do poder calorífico foi realizada na UFPR. O poder calorífico superior (PCS) dos pellets foi diretamente calculado (cal/g), utilizando uma bomba calorimétrica adiabática IKA WERKE C-5001 (Figura 9), seguindo a norma ASTM. E711-87: Método de Teste Padrão

para Valor Calorífico Bruto de Combustível Derivado de Resíduos pelo Calorímetro de Bomba, (ASTM, 2004).

Figura 9: Bomba calorimétrica utilizada para análise do poder calorífico dos pellets.

Fonte: O autor (2022).

4.7. Análise química imediata

A análise química imediata dos pellets foi realizada de acordo com a norma ASTM E870-82: Métodos de Ensaio Padrão para Análise de Combustíveis de Madeira (ASTM, 2013a), para determinação das seguintes características: (i) teor de materiais voláteis (TMV); (ii) teor de cinzas (TC); e (iii) carbono fixo (CF).

Todas as análises imediatas foram realizadas na UFPR, em triplicatas, utilizando mufla (Figura 10) com controle de aquecimento. A determinação TMV dos pellets, foi realizada de acordo com a norma ASTM E872-82 (2019). Cada amostras dos pellets produzidos foram inicialmente moídas. Os cadinhos de porcelana foram previamente calcinados à 700°C por 3 horas. Em seguida, colocou-se 3 gramas de cada amostra de pellets moídos no cadinho com tampa no forno mufla. O TMV foi determinado pela perda de massa à 950ºC ± 10ºC, durante 7 minutos, e calculados através da Equação 3.

$$TMV = \frac{m_2 - m_3}{m} * 100 \qquad \text{Eq. 3}$$

Onde: TMV: teor de materiais voláteis (%); m_2: massa inicial do cadinho e da amostra (g); m_3: massa final do cadinho e da amostra (g); m: massa da amostra (g).

Figura 10: Forno mufla utilizado no presente trabalho.

Fonte: O autor (2022).

Para obtenção do TC, seguindo a norma ASTM. D1102-84, (2013b), as amostras foram colocadas novamente em forno mufla a 650ºC ± 10ºC, onde permaneceram por 7 horas, e após esse período foram resfriadas e pesadas para determinação do teor de cinzas (TC). O cálculo do teor de cinzas das amostras foi determinando pela Equação 4.

$$TC = \frac{m_1 - m_0}{m} * 100 \qquad \text{Eq. 4}$$

Onde: TC: teor de cinzas (%); m_0: massa do cadinho (g); m_1: massa do cadinho e do resíduo (g); m: massa da amostra (g).

O CF é um valor calculado com base na norma ASTM E870-82 (2013a). É a resultante da soma da porcentagem de matéria volátil e teor de cinzas e subtraída de 100, através da Equação 5.

$$CF\ (\%) = 100 - (TMV + TC) \qquad \text{Eq. 5.}$$

Onde: CF: carbono fixo (%); TMV: teor de materiais voláteis (%); TC: teor de cinzas (%).

4.8. Durabilidade mecânica

Todas as análises foram realizadas na UFPR, em forma de duplicata. Os testes foram determinados conforme as normativas: DIN EN 15210-1: 2010-04**,** Biocombustíveis sólidos - Determinação da durabilidade mecânica de pellets e briquetes (CEN, 2005b); e, ABNT NBR 8740/85: Carvão vegetal- Determinação de índice de quebra e abrasão (ABNT, 1985), sofrendo uma adaptação da friabilidade.

O ensaio de durabilidade mecânica (Dur) para determinação da resistência dos pellets foi determinada com auxílio de um tambor rotativo (Figura 11), a velocidade de 50 rpm por 10 min. As amostras foram submetidas a choques controlados por colisão de pellets uns contra os outros e contra as paredes da câmara de teste. Uma peneira de 3,15 mm de abertura foi utilizada para retirar e pesar os finos ($F_{(\%)}$). A durabilidade é calculada a partir da massa de amostra restante após a separação das partículas quebradas e finas, para isso foram utilizadas amostras de 500 g de pellets, em 5 repetições.

Figura 11: Tambor rotativo para teste de durabilidade mecânica (friabilidade) “modificado”.

Fonte: O autor (2022).

4.9. Análise estatística

Foi utilizado *software TBCO Statistica*™ para aplicação dos métodos estatísticos no conjunto de dados de quatro amostras de pellets (PMP, PCC, PSM, PBC). Foi realizada a análise descritiva das medidas estatísticas, ANOVA *one-way*, e análise de correlação do conjunto de dados separados em materiais de biomassa florestal e materiais não-lenhosos. Para todas as análises foi estabelecido nível de significância de 5% ($p < 0,05$).

4.10. Norma

A Norma ENplus ISO 17225-2 (2014), para uso industrial pellets de biomassa de origem florestal, considerando o esquema de certificação EN plus que define três classe de qualidade de pellet e são nomeadas EN A1, EN A2 e EN B e a norma europeia ISO 17225-6, para uso industrial para pellets de origem de composição não-lenhosas, que define duas classes de aceitação que são nomeadas classe A e classe B, foram utilizadados para fins de comparação

da qualidade (propriedades físico-químicas) dos pellets de biomassa florestal (Tabela 1) e de biomassa não-lenhosa (Tabela 2).

Tabela 1: Especificações técnicas das propriedades físico-químicas dos pellets de biomassa florestal para uso industrial.

Especificações técnicas das propriedades físico-químicas dos pellets de biomassa florestal (C3) para uso industrial.	**ISO 17225-2**		
Classe	**Uso industrial**		
	A1	**A2**	**B**
Densidade a granel (kg.m^{-3})	≥ 600	≥ 600	≥ 600
Teor de umidade (%) (base úmida)	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Teor de cinzas (%)	≤ 1,0	≤ 1,5	≤ 3,0
Poder calorífico (MJ.kg^{-1})	≥ 16,5	≥ 16,5	≥ 16,5
Durabilidade mecânica (%)	97,5 a 99,0	97,0 a 99,0	96,5 a 99,0
Finos (%)	≤ 4,0	≤ 5,0	≤ 6,0

Fonte: Adaptado de EN *plus* (2014).

Tabela 2: Especificações técnicas das propriedades físico-químicas dos pellets de biomassa não-lenhosa para uso industrial.

Especificações técnicas das propriedades físico-químicas dos pellets de biomassa não-lenhosas (C4) para uso industrial.	**ISO 17225-6**	
Classe	**Uso industrial**	
	A	**B**
Densidade a granel (kg.m^{-3})	≥ 600	≥ 600
Teor de umidade (%) (base úmida)	≤ 12	≤ 15
Teor de cinzas (%)	≤ 5,0	≤ 10,0
Poder calorífico (MJ.kg^{-1})	≥ 14,1	≥ 13,1
Durabilidade mecânica (%)	≥ 97,5	≥ 96,0
Finos (%)	≤ 2	≤ 2

Fonte: Adaptado de EN *plus* (2014).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das análises de caracterização dos Pellets de maravalha de Pinus (PMP), Pellets de resíduo de bagaço da Cevada (PBC), Pellets de Sabugo de milho (PSM) e Pellets de Casca de cebola (PCC) são apresentadas na Tabela 3. As medidas descritivas relativas à média, mediana, desvio padrão, variância e aos valores máximos e mínimos dos parâmetros analisados das amostras de PMP, PCC, PSM e PBC se encontram no Apêndice e as representações gráficas dessas medidas se encontram no Apêndice II. Os resultados das análises estatísticas estão apresentados no Apêndice III.

Tabela 3: Médias do teor de umidade, densidade a granel, durabilidade mecânica e teor de finos, teor de materiais voláteis, teor de cinzas, carbono fixo e poder calorifico dos pellets de maravalha de *Pinus*, casca de cebola, sabugo de milho e bagaço de cevada.

Pellets	$U_{(\%)}$ (%)	D_a (kg/m^3)	Dur (%)	$F_{(\%)}$ (%)	TMV (%)	TC (%)	CF (%)	PCS (MJ/kg)
PMP	11,09	592,93	99,18	0,82	84,5	0,282	15,21	19,14
PCC	11,66	756,24	99,46	0,54	62,98	21,13	15,89	13,65
PSM	11,61	607,95	99,23	0,77	80,28	2,63	17,08	17,09
PBC	10,2	600,17	97,77	2,23	74,51	8,55	16,94	16,80

Onde: $U_{(\%)}$: teor de umidade; D_a: densidade a granel; Dur: durabilidade; $F_{(\%)}$: finos; TMV: teor de materiais voláteis; TC: teor de cinzas; CF: carbono fixo; PCS: poder calorífico superior; PMP: pallets de maravalha de *Pinus*; PCC: pallets de casca de cebola; PSM: pallets sabugo de milho; PBC: pallets bagaço de cevada.

Fonte: O autor (2022).

5.1. Pellets de biomassa florestal

De acordo com van Loo e Koppejan (2008), o teor de umidade da matéria-prima lenhosa antes do processo de pelletização deve estar na faixa de 8% a 12%. A média de teor de umidade de equilíbrio da madeira das amostras de biomassa de MP antes do processo de pelletização foi de 9,89%.

A norma ISO 17225-2 (2014), estabelece que pellets de material lenhoso para uso industrial deve apresentar umidade menor ou igual a 10%. Desta maneira, a amostra de PMP não se encontra em conformidade com a ISO 17225-2 (2014), visto que apresentou média de teor de umidade de aproximadamente 11,1%, desvio padrão de 1,3, e valores máximos e

mínimos de 12,4% e 9,9%, respectivamente.

Van Loo e Koppejan (2008) afirmam que pellets de madeira devem apresentar no máximo 10% de teor de umidade. Duca et al (2014) analisaram as características de pellets de madeira, e observaram média de teor de umidade de 6,7%, com desvio padrão de 1,4. Arranz et al (2015) analisaram o teor de umidade de pellets de resíduos de madeira e observaram média de valores de 7,29% e 6,42% para a amostras da mesma espécie de *Pinus* localizadas em duas regiões diferentes na Europa. Entretanto, García et al (2019) realizaram estudos sobre a variação do teor de umidade da biomassa e a temperatura do processo de pelletização, e encontraram resultados de teor de umidade de pellets de madeira acima de 10%.

O teor de umidade de combustíveis de biomassa varia de acordo com o tipo de biomassa e as características de armazenamento da biomassa (VAN LOO e KOPPEJAN, 2008). Materiais lenhosos são higroscópicos, ou seja, apresentam potencial de adsorver a umidade do ambiente. A isoterma de sorção é caracterizada pela relação entre o teor de umidade de equilíbrio da madeira e a umidade relativa do ambiente em temperatura constante (HARTLEY e AVRAMIDIS, 1993). Hartley e Wood (2008) analisaram as propriedades higroscópicas e o aumento de volume de pellets de madeira em temperatura constante e constataram que há relação linear entre a umidade ambiente e o teor de umidade de equilíbrio da madeira e, ainda, relação não-linear entre o teor de umidade e volume dos pellets. De acordo com os autores, entre a faixa de 60% a 80% de umidade ambiente e temperatura constante de 22ºC, o teor de umidade de equilíbrio da madeira em pellets pode variar entre 10% e 13%. Ainda, os pellets de madeira podem sofrer desintegração caso sejam submetidos a umidade ambiente superior a 93%. Lehtikangas (2000) analisou as mudanças de teor de umidade de pellets produzidos a partir de resíduos de madeira e condicionados ambientalmente com umidade entre 85% a 90% e temperatura constante de 20ºC, e constatou que os pellets atingiram teor de umidade de equilíbrio da madeira de 12,4% após 30 dias de experimento.

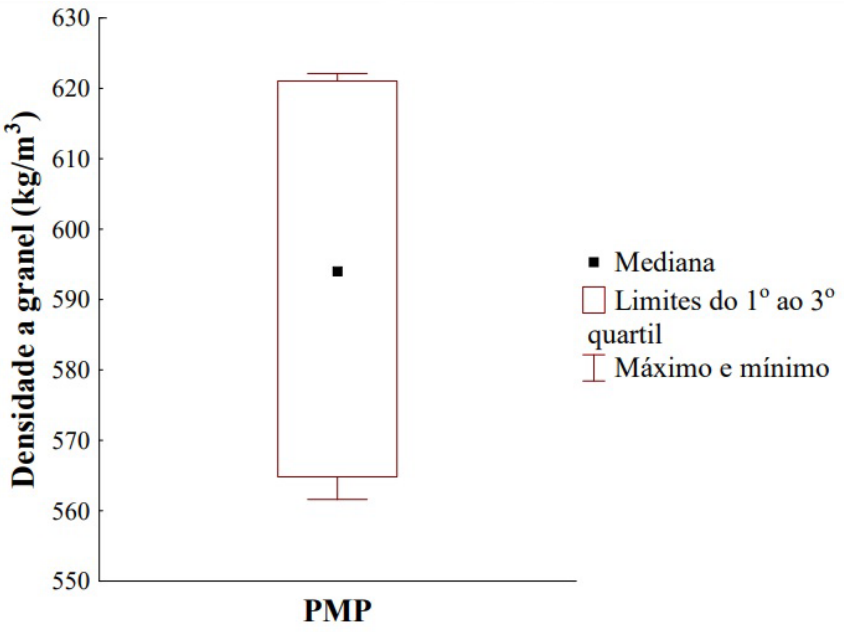
A média mensal da umidade relativa do ar no município de Guarapuava, onde as análises de umidade foram realizadas, pode variar entre 75% a 85% durante o ano, e temperatura, de 13,2ºC a 20,7ºC (CLIMATE-DATA, 2022). Dessa maneira, o aumento do teor de umidade de PMP pode ter sido influenciado pela umidade do ambiente.

De acordo com van Loo e Koppejan (2008), caso o teor de umidade do biocombustível de biomassa esteja elevada, é recomendada a secagem do material antes do processo de

combustão, pois pode aumentar a temperatura de combustão e diminuir o tempo de permanência do biocombustível na câmara de combustão, além de evitar emissões gasosas indesejáveis resultantes da combustão incompleta do combustível. O aumento da temperatura pode liberar água da biomassa durante o processo de pelletização e ocasionar na redução de umidade dos pellets de madeira (GARCÍA et al, 2019). Sokhansanj e Hess (2009) afirmam que os pellets podem perder de 1,5% a 2% de teor de umidade caso sejam submetidos a processo de resfriamento em ambientes a 5ºC. Além de benefícios relacionados à redução da umidade, o resfriamento dos pellets pode contribuir positivamente com o aumento da durabilidade mecânica (GARCÍA et al, 2019).

A média da densidade a granel de PMP foi de aproximadamente 593 kg/m^3, com desvio padrão de 32,586. A Figura 12 apresenta a dispersão dos valores de granel das amostras de PMP analisadas.

Figura 12: Distribuição dos valores de densidade a granel das amostras de pellets de maravalha de *Pinus*.



Fonte: O autor (2022).

A densidade é um parâmetro importante pois pode ser relacionada a benefícios sobre a capacidade de armazenamento, transporte e aproveitamento do material (EMBRAPA, 2012a). A ISO 17225-2 (2014) determina que os pellets de biomassa florestal devem apresentar valor maior ou igual a maior ou igual a 600 kg/m³. Dessa maneira, a média de PMP não está de acordo com a norma. Ressalta-se que há amostras de PMP que se enquadraram na faixa limite desse

parâmetro estabelecida pela norma, visto que os valores de densidade a granel dos pellets variaram entre 622,1 kg/m^3 a 561,6 kg/m^3. Esses valores correspondem com a literatura, pois a densidade a granel de pellets de resíduos de madeira pode variar de 500 a 750 kg/m^3 (EMPRAPA, 2012a, TUMULURU et al., 2011).

Alterações em fatores físicos relativos ao processo de pelletização poderiam favorecer a melhoria do parâmetro densidade a granel de PMP. De acordo com Embrapa (2012a) e García et al (2019), a utilização de temperaturas e pressão mais elevadas durante o processo de pelletização podem aumentar a densidade dos pellets.

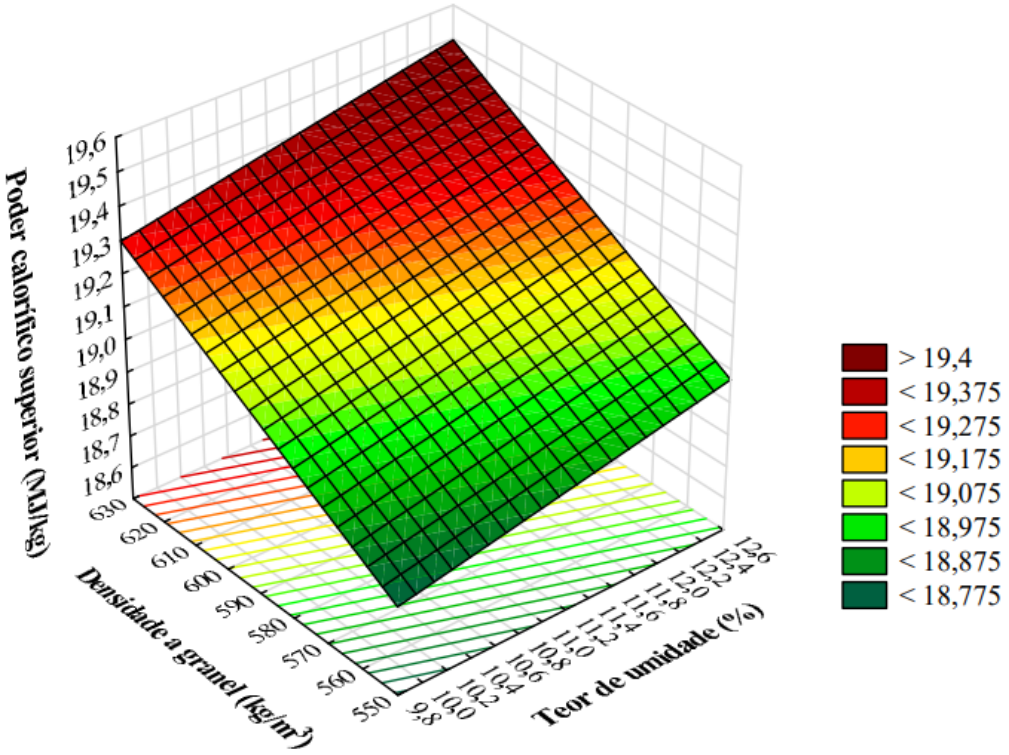
As amostras de PMP apresentaram PCS de 19,1 MJ/kg e estão em conformidade com a norma ISO 17225-2, que estabelece valores maiores ou iguais a 16,5 MJ/kg para classificação de pellets de qualidade A1.

As variáveis PCS, D_a, e $U_{(\%)}$ de PMP demonstraram correlação significativa, com coeficiente de correlação superior a 0,95 (Tabela A-3, Apêndice 3). A Equação 6 representa a função linear de correlação entre esses parâmetros e é apresentada na Figura 13.

$$PCS=0{,}071\ D_a+0{,}0066\ U_{(\%)}+14{,}4528 \qquad \text{Eq. 6}$$

Onde: PCS: poder calorífico superior (MJ/kg); D_a: densidade a granel (kg/m^3); $U_{(\%)}$: teor de umidade (%).

Figura 13: Correlação linear entre o teor de umidade e a densidade a granel em função do poder calorífico superior, de acordo com a Equação 6.



Fonte: O autor (2022).

Considerando a base de dados de PMP analisada neste estudo, o poder calorífico superior é diretamente proporcional à densidade a granel e inversamente proporcional ao teor de umidade.

O teor de umidade diminui o conteúdo energético do combustível, e então, reduz a eficiência do sistema. O teor de umidade de combustíveis deve ser o mais constante possível para minimizar as emissões e maximizar a eficiência. Teor de umidade variável em combustíveis requer maior complexidade de tecnologia de combustão e sistema de controle do processo, e consequentemente, maior custo de investimento em equipamentos (VAN LOO e KOPPEJAN, 2008).

As alterações no teor de umidade não implicam necessariamente em alterações na densidade a granel de pellets produzidos a partir de resíduos madeira (LEHTIKANGAS, 2000). Porém, Sjöström e Blomqvist (2014) realizaram estudos sobre propriedades térmicas de pellets de madeira, e afirmam que o teor de umidade de 11,7% pode ocasionar expansão do volume e, consequentemente, redução da densidade a granel e da condutividade térmica dos pellets.

As análises de TMV e CF apresentaram médias de valores de: (i) PMP, 84,5% e 15,2%.

Esses parâmetros estão de acordo com a faixa de variação de valores analisados por Arranz et al (2015).

Em relação ao TC, PMP pode ser classificado como A1, de acordo com a ISO 17225-2 (2014), o qual determina que TC deve ser menor ou igual a 1,0. O TC de PMP foi determinado em 0,28%. Esse resultado encontra-se dentro faixa de valores presentes na literatura. Arranz et al (2015), que determinaram TC de 0,5% para pellet de material semelhante. O baixo teor de cinzas pode ser um indicativo que o pellet terá um processo de combustão eficiente e com menor geração de resíduos (GARCÍA et al, 2019).

A durabilidade mecânica e geração de finos dos pelletes foram de 99,2% e 0,8% para PMP, respectivamente. O valor de durabilidade mecânica apresentou resultado proximo ao reportado por Mack et al (2019), igual a 99,3%. As amostras de PMP se enquandram nos requisitos da classe A1 da EN ISO 17225-2 (2014), que estabelece que a durabilidade mecânica esteja na faixa entre 97,5 a 99,0% e o teor de finos seja menor ou igual a 4,0%.

Sabe-se que efeitos positivos sobre a durabilidade mecânica de pellets é influenciada por: (i) teor de umidade da biomassa e temperatura de pelletização (GARCÍA et al, 2019); (ii) presença de aglutinantes na biomassa (ARZOLA; GÓMEZ, RINCÓN, 2012); (iii) espécie de árvore (LEE et al, 2013); (iv) equipamento utilizado pela palletização (ILARI et al, 2021). Logo, a alta durabilidade mecânica e baixa formação de finos de PMP pode ter relacão com: (a) como mencionado anteriormente, o teor de umidade da biomassa MP se encontrava na faixa ideal para o processo de pelletização, entre 8% a 12%, e temperatura de pelletização de 90ºC; (b) resinas naturais com propriedades aglutinantes presentes em resíduos de serraria (SJÖSTRÖM e BLOMQVIST, 2014).

5.2. Pellets de biomassa não-lenhosa

O teor de umidade média das amostras foi igual a aproximadamente 11,7% para PCC, 11,6% para PSM, e 10,2% para PBC. Tratando-se de materiais não-lenhosos (PCC, PSM e PBC), a ISO 17225-6 (2014) estabelece que os pallets de qualidade A apresentam teor de umidade menor ou igual a 12%, e pellets de qualidade B, menor ou igual a 15%. Logo, as amostras de PBC, PSM e PCC estão em conformidade com tal norma, enquadrando-se na categoria de qualidade A.

A média da densidade a granel das amostras de PCC, PSM e PBC foi de 756,2 kg/m³,

608 kg/m³ e 600,2 kg/m³, respectivamente. Os pellets de materiais não-lenhosos se encontram dentro dos padrões da norma ISO 17225-6 (2014), apresentando valores maiores ou iguais a 600 kg/m^3.

As amostras PSM e PBC obtiveram média de valores de PCS iguais a 17,1 MJ/kg e 16,8 MJ/kg, respectivamente, e estão de acordo com os parâmetros da categoria de qualidade A, estabelecidos pela norma ISO 17225-6 (2014), visto que o PCS de pellets de materiais não-lenhosos devem ser maiores ou iguais a 14,1 MJ/kg. A amostra PCC apresentou PCS igual a 13,6 MJ/kg, estando em conformidade com os requisitos da categoria B, que determina PCS igual ou maior a 13,2 MJ/kg.

Os testes de TMV e CF apresentaram médias de, respectivamente: (i) (PCC), 63% e 15,9%; (ii) PSM, 80,3% e 17,1%; e, (iii) PBC, 74,5% e 16,9%. Esses resultados são semelhantes aos dados sobre biomassa encontrados na literatura. De acordo com Ramos e Paula et al (2011), a espiga de milho apresenta TMV de 81,31 % e CF de 18,32 %, e o bagaço de cevada, TMV de 68,80 %, TC de 9,75 % e CF de 20,90 %. Domalski et al (1986) relatam TMV de 80,10 %, TC de 1,40 % e CF de 18,54% para espiga de milho.

Considerando os limites de TC da ISO 17225-6 para pellets de materiais não-lenhosos, as amostras de PSM e PBC estão em conformidade com os limites de aceitação de qualidade A e B, respectivamente. PCC não pode ser classificada como B de acordo com a norma, visto que apresenta valor superior ao limite estabelecido.

O teor de cinzas de biomassas é determinado pela composição química do material e por contaminações com sujeitas, que podem ocorrer durante a colheita, transporte e armazenamento. Biomassa armazenada no chão pode acumular sujeira, o que pode aumentar o teor de cinzas (IRENA, 2019).

O teor de cinzas da biomassa de casca de cebola é em média de 19,8% (OBIDZIŃSKI et al, 2019). Em relação ao cultivo da cebola, após a colheita a planta deve ser arrumada em linha no próprio campo por dois a três dias (COSTA, 2010). Então, o alto teor de cinzas e o menor poder calorífico de PCC, em comparação aos demais pellets analisados, podem ter relação com o elevado teor de cinzas da matéria-prima utilizada e com características do manejo da cultura da cebola.

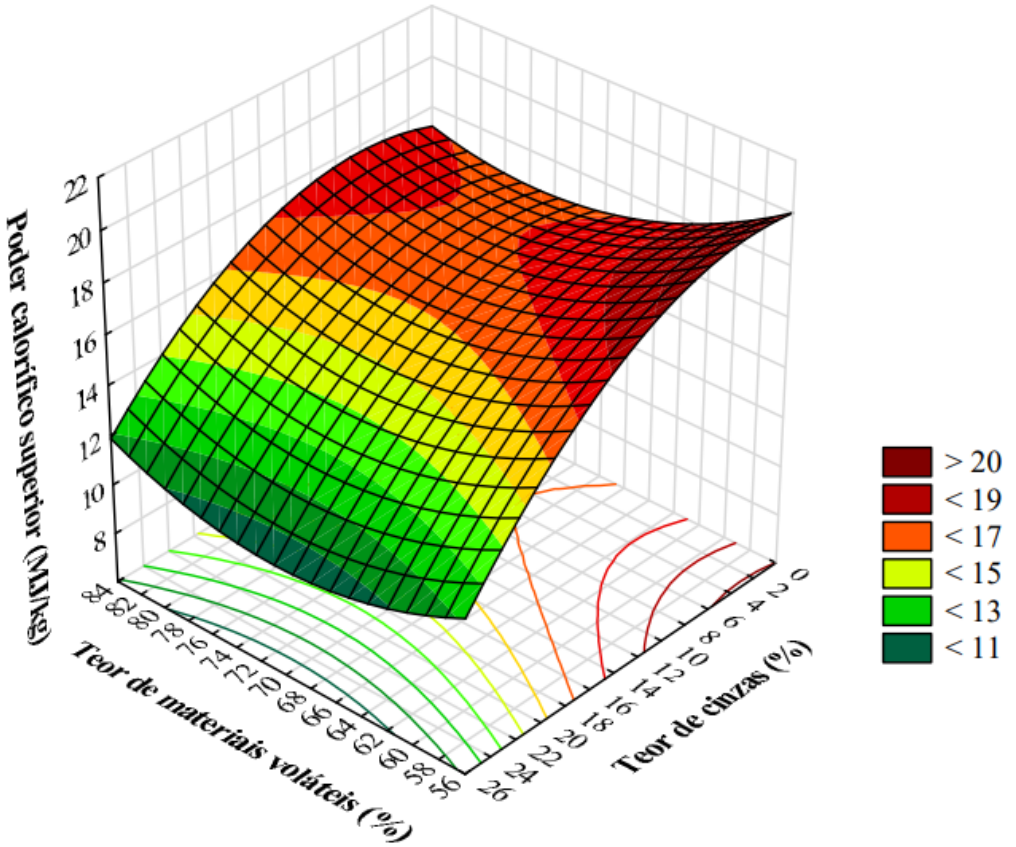
Como maneira de reduzir o teor de cinzas e aumentar o poder calorífico de pellets de biomassa, pode-se adicionar resíduo hidrolítico resultante da produção de etanol a partir de lignocelulose durante o processo de pelletização (ÖHMAN et al, 2006).

A correlação entre as variáveis de PCC, PSM e PBC é apresentada na Tabela-3B (Apêndice III). Há correlação com significância estatística ($p < 0,005$) entre poder calorífico, teor de cinzas e teor de materiais voláteis das amostras de pellets de biomassa não-lenhosa. A Figura 14 representa a correlação entre essas variáveis, de acordo com a função quadrática correspondente à Equação 7.

$$PCS=0,009*TMV^2+0,0147*TC^2+0,0034*TMV*TC-1,3627*TMV-0,1125*TC+68,037 \quad \text{(Eq. 7)}$$

Onde: PCS: poder calorífico superior (MJ/kg); TMV: teor de materiais voláteis (%); TC: teor de cinzas (%).

Figura 14: Correlação entre poder calorífico, teor de cinzas e teor de materiais voláteis das amostras de pellets de materiais não-lenhosos, de acordo com a Equação 7.



O poder calorífico dos pellets de materiais não-lenhosos produzidos a partir de casca de cebola, sabugo de milho e bagaço de cevada diminui conforme teor de cinzas aumenta.

Teor de cinzas elevado é indesejado pois adicionam peso em biocombustíveis sem aumentar o poder calorífico (IRENA, 2019). Além disso, combustíveis com teor de cinzas superior a 4% podem ocasionar danos aos equipamentos do sistema de combustão, como corrosão do queimador (MANDE, 2009).

O teor de cinzas do biocombustível é relevante para o desenvolvimento de projetos de produção de energia, uma vez que a tecnologia e equipamentos que compõe a planta devem apresentar revestimento ou controle de temperatura de combustão para resultar em menor incrustação de resíduos resultantes da queima do biocombustível (IRENA, 2019). Assim, é preferível a utilização de biocombustíveis com baixos teor de cinzas, pois podem simplificar o processo de combustão, armazenamento, utilização durante o processo de produção energética (VAN LOO e KOPPEJAN, 2008).

A norma EN ISO 17225-6, referente aos pellets de biomassa de origem não-lenhosas, estabelece que durabilidade mecânica deve ser maior ou igual a 97,5 % para a classe A e maior ou igual para classe B, e teor de finos menor ou igual a 2 % para ambas as classes. Determinadas essas condições, os PCC e o PSM se enquadraram na classe A nos dois requisitos. O PBC apresentou durabilidade maior que 97,5%, porém não se encontra em conformidade com a norma no requisito de teor de finos.

Há dificuldades em encontrar registros na literatura sobre a produção e características de pellets de bagaço de cevada. Dessa maneira, deve-se considerar que a formação de finos de PBC pode estar relacionada a fatores importantes para a produção de pellets, de maneira geral.

De acordo com Tumuluru (2018), tamanho de partícula da matéria-prima, pressão e temperatura da máquina pelletizadora são fatores que podem influenciar diretamente no teor de finos de pellets. Logo, suspeita-se que a granulometria reduzida da matéria-prima BC pode ter levado ao aumento do teor de finos nas amostras de PBC, e nesse caso, a presença de um material aglutinante poderia aumentar a qualidades desses pallets.

A Tabela 4 apresenta os resultados da avaliação de aprovação dos parâmetros analisados das amostras de acordo com as especificações técnicas estabelecidas pelas normas europeias sobre pellets de biomassa florestal e não-lenhosa.

Tabela 4: Qualidade das amostras de pellets em relação aos parâmetros das normas EN ISO 17225-2 (2014) e a EN ISO 17225-6 (2014).

Pârametro	PMP[1]	PSM[2]		PBC[2]
Densidade a granel (kg.m^{-3})	R	A	A	A
Teor de umidade (%) (base úmida)	R	A	A	A
Teor de cinzas (%)	A	A	R	A
Poder calorífico (MJ.kg^{-1})	A	A	A	A
Durabilidade mecânica (%)	A	A	A	A
Finos (%)	A	A	A	R
Categoria	-	A	-	-

[1] De acordo com a EN ISO 17225-2 (2014), para biomassa de origem lenhosa;
[2] De acordo com a EN ISO 17225-6 (2014), para biomassa não-lenhosa.
Onde: A: aprovado; R: reprovado; PMP: pallets de maravalha de *Pinus*; PCC: pallets de casca de cebola; PSM: pallets sabugo de milho; PBC: pallets bagaço de cevada.

Fonte: O autor (2022).

Apenas PSM pode ser enquadrado na categoria A de acordo com as especificações técnicas da norma europeia, e, assim, apresenta potencial para exportação como biocombustível sólido de qualidade. PMP, PCC e PBC apresentam-se dentro dos padrões europeus relativos ao poder calorífico e durabilidade mecânica. Entretanto, ajustes no processo de pelletização podem melhorar as características desses pellets, e consequentemente, potencializar a importância desses biocombustíveis sólidos produzidos a partir de resíduos agroindustriais no cenário mundial de produção de energia renovável.

6. CONCLUSÕES

O desenvolvimento de alternativas de produção de energia a partir de biomassa de resíduos da agroindústria é uma importante ferramenta para a sustentabilidade da matriz energética de um país.

Com os resultados obtidos, é possível afirmar a partir de análises físico-químicas de pellets produzidos com resíduos de maravalha de pinus (PMP), de casca de cebola (PCC), de sabugo de milho (PSM), e de bagaço de cevada (PBC), que:

(i) Há potencial de utilização da biomassa residual de sabugo de milho para produção, comercialização e exportação de pellets com foco na geração de energia em industrias, pois PMP foi aprovado nos requisitos estabelecidos pela norma ISO 17225-6 (2014), sobre pellets de materiais não-lenhosos, enquadrando-se na categoria de qualidade A;

(ii) Os resíduos de maravalha de *Pinus*, casca de cebola, sabugo e milho e bagaço de cevada apresentam potencial de aproveitamento para a produção de biocombustíveis sólidos de alto conteúdo energético. É importante ressaltar que a utilização de maravalha de pinus e bagaço de cevada fica resguardada a possíveis ajustes no processo de pelletização;

(iii) A característica higroscópica da biomassa de maravalha de *Pinus* aliada às condições ambientais favoráveis pode influenciar no aumento do teor de umidade e na redução da densidade a granel de PMP, que foi reprovado nesses requisitos estabelecidos pela EN ISO 17225-2. Porém o processo de resfriamento após a pelletização pode contribuir com a melhoria da qualidade dos pellets;

(iv) A biomassa de casca de cebola apresenta elevado teor de cinzas e pode apresentar impurezas oriundas do manejo da cultura agrícola, o que pode ter ocasionado a reprovação de PCC no requisito da EN ISO 17225-6 (2014) teor de cinzas. Mas, a adição de resíduo lignocelulósico pode diminuir o teor de cinzas e aumentar o poder calorífico do pellet;

(v) A literatura carece de estudos sobre características de pellets de bagaço de cevada. PBC reprovou nos requisitos da EN ISO 17225-6 (2014) teor de finos. Porém, acréscimos na temperatura e pressão no processo de pelletização podem ocasionar em melhores resultados desse parâmetro;

7. SUGESTÕES DE ESTUDOS FUTUROS

Para continuidade da pesquisa sobre a biomassa residual apresentada neste trabalho, pode-se realizar processos de pelletização com diferentes temperaturas ou pressão, e processo de resfriamento após a produção de pellets, para otimizar os parâmetros para validação dos requisitos da ENplus ISO 17225 (2014).

Também, seria interessante realizar estudos sobre a pelletização de materiais compostos por frações distintas de biomassa de residual para favorecer as características físico-químicas de pellets a partir da propriedade aglutinante de resíduos orgânicos.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARRANZ, J. I.; MIRANDA, M. T.; MONTERO, F. J.; SEPÚLVEDA, F. J.; ROJAS, C. V. Characterization and combustion behaviour of commercial and experimental wood pellets in South West Europe. **Fuel**, v.142(February), p.199-207, 2015. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.10.059

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DA BIOMASSA (ABIB); INSTITUTO BRASILEIRO PELLETS, BIOMASSA E BRIQUETE (IBP). **Conjuntura Nacional e Internacional Setor Industrial de Biomassa Pellets e Briquetes**. Curitiba, PR: ABIB/IBP, 2019. 126p. Disponível em: https://www.biomassabioenergia.com.br/imprensa/abib-divulga-relatorio-conjuntura-nacional-e-internacional-setor-industrial-de/20190830-163547-y305. Acesso em: 16 jul. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 8740/85**: **Carvão vegetal - Determinação de índice de quebra e abrasão**. Rio de Janeiro: ABNT, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 6922. Carvão vegetal - Ensaios físicos - Determinação da massa específica - Densidade a granel.** Rio de Janeiro, 1981.

ANEEL-Agência Nacional de Energia Elétrica. Publicado em: 21/01/2020. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2020/01/fontes-de-energia-renovaveis-representam-83-da-matriz-eletrica-brasileira>. Acesso em: 14 de out. de 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM. E872-82**: Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM. D1102-84**: Standard Test Method for Ash in Wood. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2013b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM. E870-82**: Standard Test Methods for Analysis of Wood Fuels. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2013a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM. E711-87:** Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by the Bomb Calorimeter**.** West Conshohocken, PA: ASTM International, 2004.

ARZOLA, N.; GÓMEZ, A.; RINCÓN, S. The effects of moisture content, particle size and binding agent content on oil palm shell pellet quality parameters. **Ingenieria e Investigación,** v.32, n.01, p.24–29, 2012. Disponível em: http://www.scielo.org.co/pdf/iei/v32n1/v32n1a05.pdf. Acesso em: 16 jul. 2022.

BATISTA, D.C.; KLITZKE, R. J.; ROCHA, M. P.; BATISTA, T. R. Ensaio da taxa de secagem e escore de defeitos para predição da qualidade da secagem convencional da madeira de *Eucalyptus* sp. - parte 2. **Floresta e Ambiente**, v.23, n.01, p.135-141, 2016. http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.046613

BARROS, J. F. C; CALADO, J. G. **A cultura do milho**. 2014. Disponível em: <https://dspace.uevora.pt/rdpc/handle/10174/10804>. Acesso em: 16 jul. de 2022.

BENNETT, P. Press release – the dawn of greater energy independence. **Bioenergy News**, v. 34, n.01, p.02-03. Disponível em: https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2022/08/IEA-Bioenergy-newsletter-web_July-2022-tt.pdf. Acesso em 16 jul. 2022.

BRASIL. Lei n° 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2017b. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/l13576.htm. Acesso em: 20 jun. 2022.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). **Balanço Energético Nacional 2020: ano base 2019**. Rio de Janeiro, RJ: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2020a. 264p. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf. Acesso em: 16 jul. 2022.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). **PNE 2050: Plano Nacional de Energia**. Brasília, DF: MME/Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2020b. 243p. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf. Acesso em: 16 jul. 2022.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G.; MURAMOTO, M. C.; COUTO, H. T. Z. Estimativa

da densidade a granel do carvão vegetal partir de sua densidade aparente. **Circular técnica Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, n.150(outubro), 1982. 6p. Disponível em: https://www.ipef.br/PUBLICACOES/ctecnica/nr150.pdf. Acesso em: 16 jul. 2022.

CLIMATE-DATA. Dados climatológicos para Guarapuava. Disponível em: https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/parana/guarapuava-4487/. Acesso em: 20 jul. 2022.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **CEN/TS 15210 - 1**: Methods for determination mechanical durability of pellets. Solid biofuels – fuel specification and classes. London, 2005b.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **CEN/TS 15103**: Solid biofuels – Methods for the determination of bulk density. London, 2005a.

COSTA F, D. V. SILVA, A. J.; SILVA, P. A. P.; SOUSA, F. C. **Aproveitamento de resíduos agroindustriais na elaboração de subprodutos**. II Congresso Internacional das Ciências Agrárias–COINTER–PDVAgro, 2017. 8p. Disponível em: https://cointer-pdvagro.com.br/wp-content/uploads/2018/02/APROVEITAMENTO-DE-RES%C3%8DDUOS-AGROINDUSTRIAIS-NA-ELABORA%C3%87%C3%83O-DE-SUBPRODUTOS.pdf. Acesso em: 16 jul. 2022.

COSTA, N. D. **A cultura da cebola**. Petrolina, PE: Embrapa semiárido, junhom 2010. 12p. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/156688/1/Aculturadacebola.pdf. Acesso em: 16 jul. 2022.

COSTA, R. C.; PRATES, C. P. T. **O papel das fontes renováveis de energia no desenvolvimento do setor energético e barreiras à sua penetração no mercado**. Rio de Janeiro, RJ: BNDES, n.21, março, p.5-30, 2005. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2436/2/BS%2021%20O%20papel%20das%20fontes%20renov%c3%a1veis_P.pdf. Acesso em: 16 jul. 2022.

DE CEVADA, Comissão De Pesquisa. Indicações técnicas para produção de cevada cervejeira: safras 2001 e 2002. **Embrapa Trigo - Livro científico (ALICE)**, 2001. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/820473/1/ID8704LV0419.pdf. Acesso em: 05 de mai. De 2021.

DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG – DIN **EN 15103** – Solid biofuels – Determination of bulk density. Alemanha, 2010.

DOMALSKI, E. S.; JOBE JUNIOR, T. L.; MILNE, T. A. **Thermodynamic data for biomass conversion and waste incineration**. Report from the Solar technical Information program, 1986. [Washington, DC]: National Bureau of Standards, 1986. Disponível em: https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/2839.pdf. Acesso em: 2 de jul. 2022.

DUCA, D.; RIVA, G.; PEDRETTI, E. F.; TOSCANO, G. Wood pellet quality with respect to EN 14961-2 standard and certifications. **Fuel**, v. 135(November), p. 09-14, 2014. http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2014.06.042

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA**). Aspectos físicos, químicos e tecnológicos do grão de milho**. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, dezembro, 2006. 6p. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/489376/1/Circ75.pdf. Acesso em: 16 jul. 2022.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Aspectos econômicos e conjunturais da cultura da cevada**. Brasília, DF: Embrapa, n.139, 2012b. 20p. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/969146/1/2012documentosonline139.pdf. Acesso em: 16 jul. 2022.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **A cultura da cebola**. Brasília, DF: Embrapa, 2002. 107p. ISBN 85-7383-158-8. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/108708/1/Aculturadacebola.pdf. Acesso em: 16 jul. 2022.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Cultivo da cebola no Nordeste**. Brasília, DF: Embrapa, 2007. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/162405/1/Cultivodacebola.pdf. Acesso em: 16 jul. 2022.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. 1ª ed. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, Documentos 13, outubro, 2012a. 130p. ISSN 2177-4439;013. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/952626/1/DOC13.pdf. Acesso em: 16 jul. 2022.

EUROPEAN PELLET COUNSIL (EPC). EN*plus*: Quality certification scheme for wood pellets, Handbook, part 2 - certification procedure. Bruxelas, Bélgica: EPC, v.03, August, 2015.

50p. Disponível em: https://enplus-pellets.eu/en-in/component/attachments/?task=download&id=102:ENplusHandbook_part2_V3. Acesso em: 16 jul. 2022.

EUROPEAN PELLET COUNCIL (ECP); EN*plus*: Associação Européia de Biomassa. **Manual EN plus**, parte 3 – Requisitos de Qualidade de Pellets. Bélgica, V 3.0, pg 7, Agosto de 2015. Disponível em: https://enplus-pellets.eu/images/Handbooks/PT/ENplus-Master-Handbook-3-0-parte3-Requisitos-de-Qualidade-do-Pellet.pdf . Acesso em: 10 jun. de 2020.

EUROPEAN PELLET COUNCIL (EPC). **European wood pellet consumption**. Bruxelas, Bélgica: EPC, 2022. Disponível em: https://epc.bioenergyeurope.org/about-pellets/pellets-statistics/european-consumption. Acesso em: 16 jul. 2022.

GARCÍA, R. GIL, M. V.; RUBIERA, F.; PEVIDA, C. Pelletization of wood and alternative residual biomass blends for producing industrial quality pellets. **Fuel**, n.251(September), p.739-753, 2019. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.141

GAUTHIER, G.; AVAGIANOS, I.; CALDERÓN, C.; VASKYTE, B. **Statistical report 2020: report pellets**. Bruxélas, Bélgica: Bioenergy Europe, 2020. 120p. Disponível em: https://bioenergyeurope.org/component/attachments/?task=download&id=1478:20201210_nonmembers_SR20_pellets. Acesso em: 16 jul. 2022.

GONÇALVES, J. E.; SARTORI, M. M. P.; LEÃO, A. L. Energia de briquetes produzidos com rejeitos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 5, p. 657-661, 2009. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/GQzcmwmdM4Q8TMSJKX9kDGs/?format=pdf&lang=pt. Acesso em: 20 de jun. 2022.

GONZÁLEZ-SÁIZ, J. M.; STEBAN-DÍEZ, I.; RODRÍGUEZ-TECEDORZ, S.; PIZARRO, C. Valorization of onion waste and by-products: MCR-ALS applied to reveal the compositional profiles of alcoholic fermentations of onion juice monitored by near-infrared spectroscopy. **Biotechnology and Bioengineering**, v.101(September), p.776-787, 2008. https://doi.org/10.1002/bit.21939

HARTLEY, I. D.; AVRAMIDIS, S. Analysis of wood sorption isotherm using clustering theory. **Holzforschung**, v.47, n.02, p.163-167, 1993. http://dx.doi.org/10.1515/hfsg.1993.47.2.163

HARTLEY, I. D.; WOOD, L. J. Hygroscopic properties of densified softwood pellets. **Biomass and Bioenergy**, v.32, n.01, p.90-93, 2008. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.06.009

ILARI, A.; PEDRETTI, E. F.; FRANCESCO, C.; DUCA, D. Pellet Production from Residual Biomass of Greenery Maintenance in a Small-Scale Company to Improve Sustainability. **Resources**, v.10, n.122, p.01-12, 2021. https://doi.org/10.3390/resources10120122

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **2020: Relatório anual**. São Paulo, SP: IBÁ, 2020, 66p. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA); FOOD AN AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **How2Guide for Bioenergy Roadmap Development and Implementation**. 2017. 78p. ISBN 978-92-5-109586-7. Disponível em: http://www.fao.org/3/i6683e/i6683e.pdf. Acesso em: 28 jun. 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 17225-2**: Solid biofuels — Fuel specifications and classes — Part 2: Graded wood *pellets*. S.L: ISO, 2014. 9 p. Disponível em: https://www.mard.gov.vn/VanBanLayYKien/VBPLFile/EN-ISO-17225-2-2014-PN.pdf . Acesso em: 10 jun. 2020

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 17225-6:** 2014 - Solid biofuels - Part 6 - Graded non wood. Brussels, 2014b.

INSTITUTO BRASLEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo agropecuário: produção de cebola**. 2022. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/cebola/br. Acesso em: 16 jul. 2022.

INSTITUTO BRASLEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo agropecuário: produção de cevada.** 2019. Disponivel em: https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/cevada/br . Acesso em: 15 jun. 2020.

INSTITUTO BRASLEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo agropecuário: produção de milho em grão.** 2019. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/milho-em-grao/br . Acesso em: 15 de jun.2020.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Bioenergy for the energy transition: Ensuring sustainability and overcoming barriers**. Abu Dhabi: IRENA, 2022. 128p. ISBN 978-92-9260-451-6. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Aug/IRENA_Bioenergy_for_the_transition_2

022.pdf. Acesso em: 15 jun. 2022.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Solid biomass supply for heat and power: Technology brief**. Abu Dhabi: IRENA, January, 2019. 52p. ISBN 978-92-9260-107-2. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Jan/IRENA_Solid_biomass_supply_2019.pdf. Acesso em: 15 jun. 2022.

KARKANIA, V.; FANARA, E.; ZABANIOTOU, A. Review of sustainable biomass pellets production – A study for agricultural residues pellets' market in Greece. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.16, n.03, p.1426-1436, 2012. https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.11.028

LAMERS, P.; JUNGINGER, M.; HAMELINCK, C.; FAAIJ, A. Developments in international solid biofuel trade—An analysis of volumes, policies, and market factors. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.16, n.05, p.3176-3199, 2012. https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.027

LEE, S. M.; AHN, B. J.; CHOI, D. H.; HAN, G.; JEONG, H.; AHN, S. H.; YANG, I. Effects of densification variables on the durability of wood pellets fabricated with *Larix kaempferi* C. and *Liriodendron tulipifera* L. sawdust. **Biomass and bioenergy**, v.48(January), p.01-09, 2013. http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.10.015

LEHTIKANGAS, P. Storage effects on pelletised sawdust, logging residues and bark. **Biomass and Bioenergy**, v.19, n.05, p.287-293, 2000. https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00046-5

MACK, R. KUPTZ, D.; SCHÖN, C.; HARTMANN, H. Combustion behavior and slagging tendencies of kaolin additivated agricultural pellets and of wood-straw pellet blends in a small-scale boiler. **Biomass and Bioenergy**, v.128(June), p.50-62, 2019. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.04.003

MALICO, I.; PEREIRA, R. N.; GONÇALVES, A. C.; SOUSA, A. M. O. Current status and future perspectives for energy production from solid biomass in the European industry. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.112(September), p.960-977, 2019. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.022

MANI, S.; TABIL, L. G.; SOKHANSANJ, S. Evaluation of compaction equations applied to four biomass species. **Canadian Biosystems Engineering**, v.46, n.03, p.55-61, 2004. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/230704492_Evaluation_of_compaction_equations_applied_to_four_biomass_species. Acesso em: 16 jul. 2022.

MANDE, S. P. Thermo chemical conversion of biomass. In: KISHORE,V. V. N. (Ed.). **Renewable energy engineering and technology**. New Delhi: The Energy and Resources Institute, 2009. p. 705-728. https://doi.org/10.1016/j.pep.2008.10.010

MARAFON, A. C.; SANTIAGO, A, D.; AMARAL, A. F. C.; BIERHALS, A. N.; PAIVA, H. L.; GUIMARÃES, V. S. Secagem ao sol do capim-elefante para uso na geração de energia térmica. **Revista BiomassaBR**, v.06, n.33, p.10-13, 2017. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/1083552/1/Secagem.pdf. Acesso em: 16 jul. 2022.

MARTO, G. B. T. Indicações para escolha de espécie de *pinus*. **Revista da madeira**, n.119, Agosto, 2009. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1381&subject=Pinus&title=Indica%E7%F5es%20para%20escolha%20de%20esp%E9cies%20de%20pinus#:~:text=A%20escolha%20da%20esp%C3%A9cie%20ideal,clima%2C%20solo%2C%20entre%20outros.&text=Arboriza%C3%A7%C3%A3o%2C%20parques%20e%20jardins%3A%20P,elliottii%2C%20P>. Acesso em: 16 jul. 2022.

MINELLA, E. Melhoramento da cevada. Separata de: BOREM, A. (Ed.). **Melhoramento de espécies cultivadas**. Viçosa, MG: UFV, 1999. Disponível em: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/825403/1/CNPTID13601.pdf. Acesso em: 12 de mai. de 2021.

NASRIN, A. B.; LOH, S. K.; SURIKAN, M. A.; BUKHARI, N. A.; AZIZ, A. A.; LIM, J.; LIM, S.; CHIN, E. Production and characterization of low-ash empty fruit bunches pellets as a solid biofuel. **BioEnergy Research**, n.15(August), p.517-129, 2022. https://doi.org/10.1007/s12155-021-10316-x

OBERNBERGER, I.; BRUNNER, T; BÄRNTHALER, G. Chemical properties of solid biofuels—significance and impact. **Biomass and bioenergy**, v.30, n.11, p.973-982, 2006. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.06.011

OBIDZIŃSKI, S.; DOŁŻYŃSKA, M.; KOWCZYK-SADOWY, M.; JADWISIEŃCZAK, K.; SOBCZAK, P. Densification and fuel properties of onion husks. **Energies**, v.12, n.24, p.01-18, 2019. http://dx.doi.org/10.3390/en12244687

ÖHMAN, M.; BOMAN, C.; HEDMAN, H.; EKLUND, R. Residential combustion

performance of pelletized hydrolysis residue from lignocellulosic ethanol production. **Energy Fuels**, v.20, n.03, p. 1298-1304, 2006. https://doi.org/10.1021/ef058030g

PARANÁ. Secretaria da Agricultura e do Abastecimento (SEAB). **Prognóstico olericultura – novembro 2020**. Curitiba, PR: Departamento de Economia Rural (DERAL), novembro, 2020. 7p. Disponível em: https://www.agricultura.pr.gov.br/sites/default/arquivos_restritos/files/documento/2021-09/olericultura_2021.pdf. Acesso: 16 jul. 2022.

PIECHOWIAK, T.; GRZELAK-BLASZCZYK, K.; BONIKOWSKI, R.; BALWEJDER, M. Optimization of extraction process of antioxidant compounds from yellow onion skin and their use in functional bread production. **LWT**, v.117(January), 108614, p.01-07, 2020. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019

PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; TONOLI, G. H. D. GUIMARÃRES JUNIOR, M.; TRUGILHO, P. F.; MENDES, L. M. Brazilian lignocellulosic wastes for bioenergy production: characterization and comparsion with fossil fuels. **BioResources**, v.8, n.01, p.1166-1185, 2013. https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/2841

QUÉNO, L. R. M.; SOUZA, A. N.; COSTA, A. F.; VALLE, A. T.; JOAQUIM, M. S. Aspectos técnicos da produção de pellets de madeira. **Ciência Florestal**, v.29, n.03, p.1478-1489, 2019. https://doi.org/10.5902/1980509820606

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A. ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. T. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. **Revista da madeira**, v.89, n.100, p.100-106, 2005. Disponível em: https://www.lippel.com.br/dados/download/05-05-2014-10-46poder-calorifico-da-madeira-e-de-materiais-ligno-celulosicos.pdf. Acesso em: 16 jul. 2022.

RAMOS e PAULA, L. E; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; BIANCHI, M.L. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 2, p. 237-246, 2011. http://dx.doi.org/10.1590/S0104-77602011000200012

ROSA, M. F.; FILHO, M. S. M. S.; FIGUEREDO, M. C. B.; MORAIS, J. P. S.; SANTAELLA, S. T. LEITÃO, R. C. **Valorização de resíduos da agroindústria**. Foz do Iguaçu, PR: II Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais–II SIGERA, v.01, Março, p.98-105, 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Joao_Paulo_Saraiva_Morais2/publication/259850615_Valorizacao_de_residuos_da_agroindustria/links/548f2f3c0cf214269f2637c1/Valorizacao-de-residuos-da-agroindustria.pdf. Acesso em: 16 jul. 2022.

SAMUELSSON, R.; LARSSON, S. H.; THYREL, M.; LESTANDER, T. L. Moisture content and storage time influence the binding mechanisms in biofuel wood pellets. **Applied Energy**,

v. 99, p. 109-115, 2012. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.05.004

SAMUELSSON, R., THYREL, M., SJÖSTRÖM, M., & LESTANDER, T. A. Effect of biomaterial characteristics on pelletizing properties and biofuel pellet quality. **Fuel processing technology**, v. 90, n. 9, p. 1129-1134, 2009. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.05.007

SARKER; T. R.; NANDA, S.; DALAI, A. K.; MEDA, V. A Review of torrefaction technology for upgrading lignocellulosic biomass to solid biofuels. **BioEnergy Research**, n.14(March), p.645-669, 2021. https://doi.org/10.1007/s12155-020-10236-2

SHIMIZU, J. Y. S. **Pinus na silvicultura brasileira**. 1ª ed. Colombo, PR: Embrapa Florestas, 2008. 223p. ISBN 978-85-89281-26-3 Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/315381/pinus-na-silvicultura-brasileira. Acesso em: 16 jul. 2022.

SJÖSTRÖM J.; BLOMQVIST, P. Direct measurements of thermal properties of wood pellets: Elevated temperatures, fine fractions and moisture content. **Fuel**, v.134(October), p.460-466, 2014. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.05.088

SPANHOL, A.; NONES, D. L.; KUMABE, F. J. B.; BRAND, M. A. Qualidade dos pellets de biomassa florestal produzidos em Santa Catarina para a geração de energia. **Floresta**, v.45, n.04, p.833-844, 2015. http://dx.doi.org/10.5380/rf.v45i4.37950

SOKHANSANJ, S.; HESS, J. R. Biomass Supply Logistics and Infrastructure. In: MIELENZ, J. R. (editor). **Biofuels: methods and protocols**. New York, USA: Springer/Humana Press, 2009. 295p. https://doi.org/10.1007/978-1-60761-214-8

SWITHENBANK, J.; CHEN, Q.; ZHANG, X.; SHARIFI, V.; POURKASHANIAN, M. Wood would burn. **Biomass and Bioenergy**, v.35, n.03, p.999-1007, 2011. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.026

TRIPATHI, N.; HILLS, C. D.; SINGH, R. S.; ATKINSON, C. J. Biomass waste utilization in low-carbon products: harnessing a major potential resource. **Nature NPJ / Climate and Atmospheric Science**, n. 35, 2019. https://doi.org/10.1038/s41612-019-0093-5

TRØMBORG, E.; RANTA, T.; SCHWEINLE, J.; SOLBERG, B.; SKJEVRAK, G.; TIFFANY, D. G. Economic sustainability for wood pellets production–A comparative study between Finland, Germany, Norway, Sweden and the US. **Biomass and Bioenergy**, v.57(October), p.68-77, 2013. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.01.030

TUMULURU, Jaya Shankar. Effect of pellet die diameter on density and durability of pellets made from high moisture woody and herbaceous biomass. **Carbon Resources Conversion**, v.01, n.01, p.44-54, 2018. https://doi.org/10.1016/j.crcon.2018.06.002

TUMULURU, J. S.; WRIGHT, C. T.; HESS, R.; KENNEY, K. L. A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v.05(July), p.683-707, 2011. https://doi.org/10.1002/bbb.324

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Converting waste agricultural biomass into a resource.** Osaka/Shiga, Japan: United Nations Environment Programme Division of Technology, Industry and Economics International Environmental Technology Centre, 2015. 241p. Disponível em: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7614/WasteAgriculturalBiomassEST_Compendium.pdf. Acesso em: 16 jul. 2022.

VAZ JÚNIOR, S. Aproveitamento de resíduos agroindustriais: uma abordagem sustentável. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2020. 26p. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/217434/1/S-VAZ-Aproveitamento-de-resi769duos-agroindustriais.pdf. Acesso em 15 jun. 2022.

VAN DAM, J. E. G.; OEVER, M. J. A.; TEUNISSEN, W.; KEIJSERS, E. R. P.; PERALTA, A. G. Process for production of high density/high performance binderless boards from whole coconut husk: Part 1: Lignin as intrinsic thermosetting binder resin. **Industrial Crops and Products**, v.19, n.03, p.207-216, 2004. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2003.10.003

VAN LOO, S.; KOPPEJAN, J. **The handbook of biomass combustion and co-firing**. London, UK: Earthscan, 2008. 465p. ISBN: 978-1-84407-249-1

WILD, M.; VISSER, L. **Biomass pre-treatment for bioenergy – case of study 1: biomass torrefaction**. IEA Bioenergy, 2018. 23p. Disponível em: https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2018/10/CS1-Torrefaction.pdf. Acesso em: 15 jun. 2022.

ZANUNCIO, A. J. V.; MONTEIRO T. C.; LIMA, J. T.; ANDRADE, H. B.; CARVALHO, A. G. Drying biomass for energy use of *Eucalyptus urophylla* and *Corymbia citriodora* logs. **BioResources**, v.08, n.04, p.5159-5168, 2013. http://dx.doi.org/10.15376/biores.8.4.5159-5168

ZHU, X.; LI, X.; YAO, Q.; CHEN, Y. Challenges and models in supporting logistics system

for dedicated-biomass-based bioenergy industry. **Bioresource Technology**, v.102, n.02, p.1344-1351, 2011. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.122

APÊNDICES

APÊNDICE I

Tabela A-1: Descrição das medidas estatísticas dos parâmetros dos pellets de maravalha de *Pinus.*

Variáveis	Média	Desvio padrão	Variância	Máximo	Mínimo	Mediana
Teor de umidade (%)	11,087	1,3301	1,769	12,445	9,903	11,001
Densidade a granel (kg/m^3)	592,930	32,586	1061,874	622,100	561,610	594,005
Durabilidade mecânica (%)	99,177	0,579	0,335	99,550	98,320	99,420
Finos (%)	0,822	0,579	0,335	1,680	0,450	0,580
Teor materiais voláteis (%)	84,504	1,704	2,905	86,543	82,870	84,301
Teor de cinzas (%)	0,282	0,141	0,020	0,490	0,185	0,225
Carbono fixo (%)	15,214	1,829	3,344	16,944	12,966	15,474
Poder calorífico superior (MJ/kg)	19,144	0,121	0,015	19,251	19,037	19,144

Fonte: O autor (2022).

Tabela B-1: Descrição das medidas estatísticas do teor de umidade dos pellets de materiais não-lenhosos.

Pellets	Média (%)	Desvio padrão	Variância	Máximo (%)	Mínimo (%)	Mediana (%)
PCC	11,6669964	1,777739	3,160357	14,15616	10,06554	11,22314
PSM	11,6091909	1,346253	1,812398	13,03359	10,01534	11,69392
PBC	10,2006899	0,987974	0,976092	11,34758	9,14108	10,15705

Fonte: O autor (2022).

Tabela C-1: Descrição das medidas estatísticas da densidade a granel dos pellets de materiais não-lenhosos.

Pellets	Média (kg/m^3)	Desvio padrão	Variância	Máximo (kg/m^3)	Mínimo (kg/m^3)	Mediana (kg/m^3)
PCC	756,2400	0,69109	0,478	756,7200	755,2200	756,5100
PSM	607,9500	21,38315	457,239	629,0800	587,6700	607,5250
PBC	600,1675	16,94446	287,115	620,1000	578,6700	600,9500

Fonte: O autor (2022).

Tabela D-1: Descrição das medidas estatísticas da durabilidade mecânica dos pellets de materiais não-lenhosos.

Pellets	Média (%)	Desvio padrão	Variância	Máximo (%)	Mínimo (%)	Mediana (%)
PCC	99,46350	0,033242	0,001105	99,50000	99,42800	99,46300
PSM	99,23500	0,209370	0,043836	99,50200	98,99200	99,22300
PBC	97,77300	0,457321	0,209143	98,19800	97,22800	97,83300

Fonte: O autor (2022).

Tabela E-1: Descrição das medidas estatísticas dos finos dos pellets de materiais não-lenhosos.

Pellets	Média (%)	Desvio padrão	Variância (%)	Máximo (%)	Mínimo (%)	Mediana (%)
PCC	0,536500	0,033242	0,001105	0,572000	0,500000	0,537000
PSM	0,765000	0,209370	0,043836	1,008000	0,498000	0,777000
PBC	2,227000	0,457321	0,209143	2,772000	1,802000	2,167000

Fonte: O autor (2022).

Tabela F-1: Descrição das medidas estatísticas do teor de materiais voláteis dos pellets de materiais não-lenhosos.

Pellets	Média (%)	Desvio padrão	Variância	Máximo (%)	Mínimo (%)	Mediana (%)
PCC	62,98370	3,674312	13,50057	65,39768	57,51830	64,50942
PSM	80,28496	1,307761	1,71024	81,36351	78,42209	80,67711
PBC	74,51334	1,116930	1,24753	75,98804	73,31849	74,37341

Fonte: O autor (2022).

Tabela G-1: Descrição das medidas estatísticas do teor de cinzas dos pellets de materiais não-lenhosos.

Pellets	Média (%)	Desvio padrão	Variância	Máximo (%)	Mínimo (%)	Mediana (%)
PCC	21,12972	1,581553	2,50131	23,18696	19,83746	20,74722
PSM	2,63130	0,060351	0,00364	2,69784	2,57094	2,62820
PBC	8,54912	0,153725	0,02363	8,76785	8,43955	8,49455

Fonte: O autor (2022).

Tabela H-1: Descrição das medidas estatísticas do carbono fixo dos pellets de materiais não-lenhosos.

Pellets	Média (%)	Desvio padrão	Variância	Máximo (%)	Mínimo (%)	Mediana (%)
PCC	15,88658	2,314038	5,354771	19,29474	14,20644	15,02256
PSM	17,08375	1,348925	1,819600	19,00697	15,93865	16,69469
PBC	16,93754	1,250867	1,564668	18,23741	15,24410	17,13432

Fonte: O autor (2022).

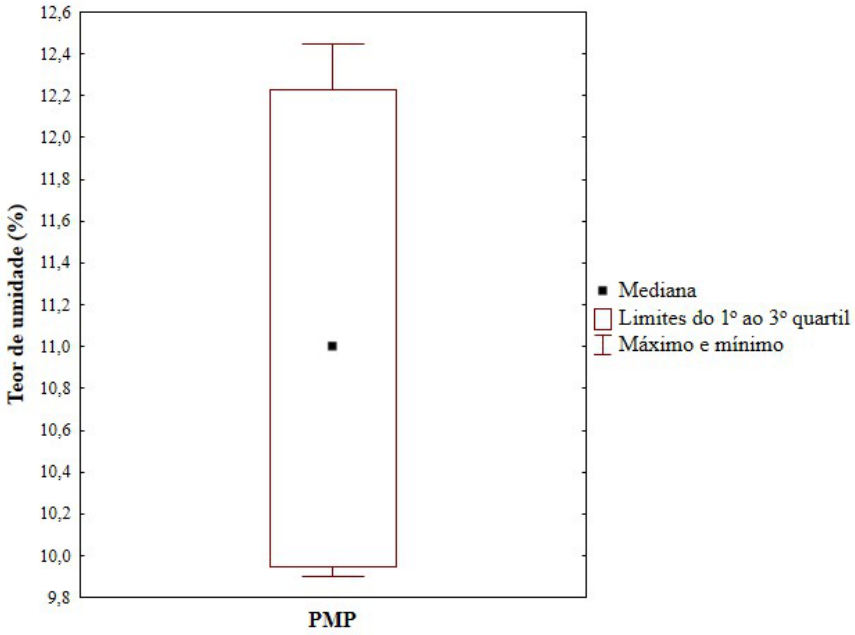
Tabela I-1: Descrição das medidas estatísticas do poder calorífico superior dos pellets de materiais não-lenhosos.

Pellets	Média (MJ/kg)	Desvio padrão	Variância	Máximo (MJ/kg)	Mínimo (MJ/kg)	Mediana (MJ/kg)
PCC	13,65135	0,032296	0,001043	13,69005	13,61892	13,64821
PSM	17,08955	0,515391	0,265628	17,80710	16,69834	16,92637
PBC	16,79667	0,052090	0,002713	16,86152	16,74855	16,78830

Fonte: O autor (2022).

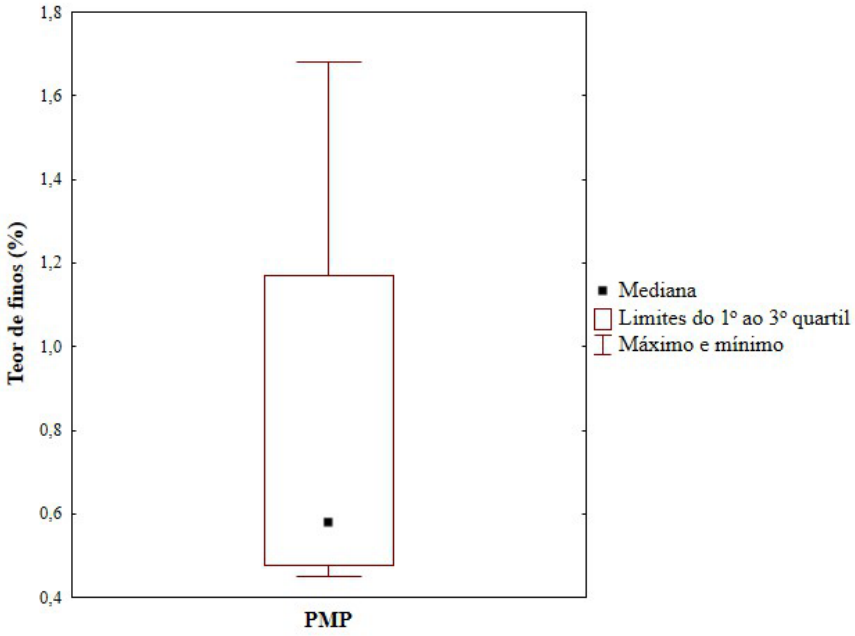
APÊNDICE II

Figura A-2: Distribuição dos valores de teor de umidade das amostras de pellets de maravalha de *Pinus*.



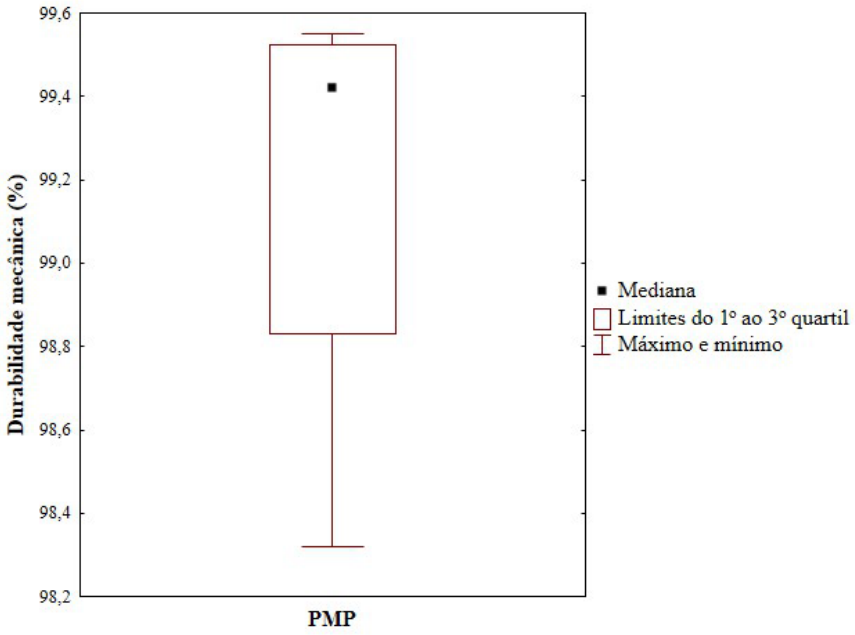
Fonte: O autor (2022).

Figura B-2: Distribuição dos valores de teor de finos das amostras de pellets de maravalha de *Pinus*.



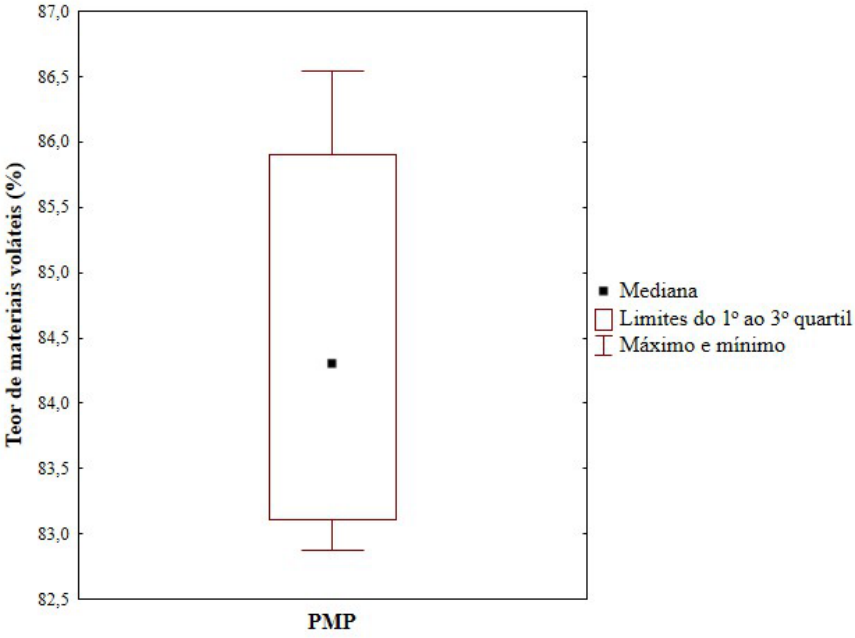
Fonte: O autor (2022).

Figura C-2: Distribuição dos valores de durabilidade mecânica das amostras de pellets de maravalha de *Pinus*.



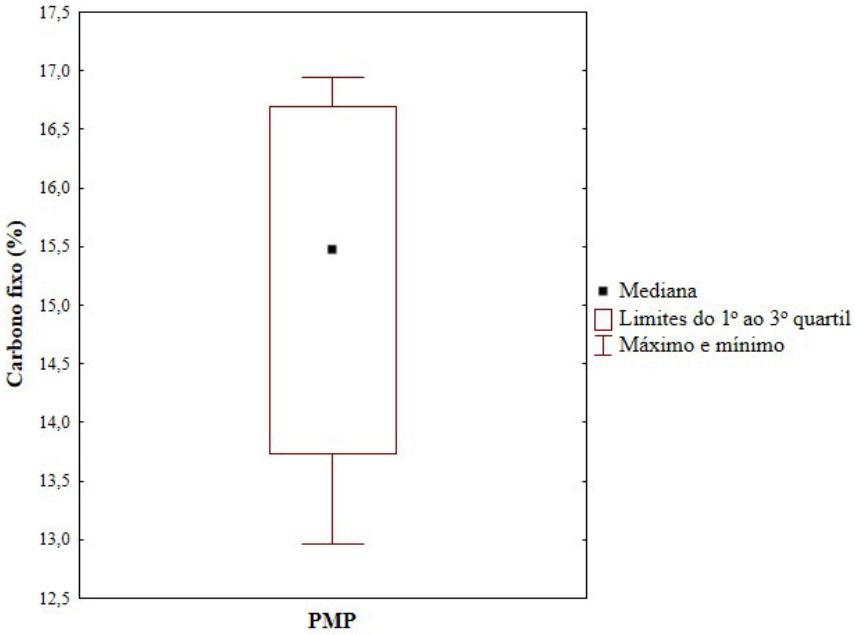
Fonte: O autor (2022).

Figura D-2: Distribuição dos valores de teor de materiais voláteis das amostras de pellets de maravalha de *Pinus*.



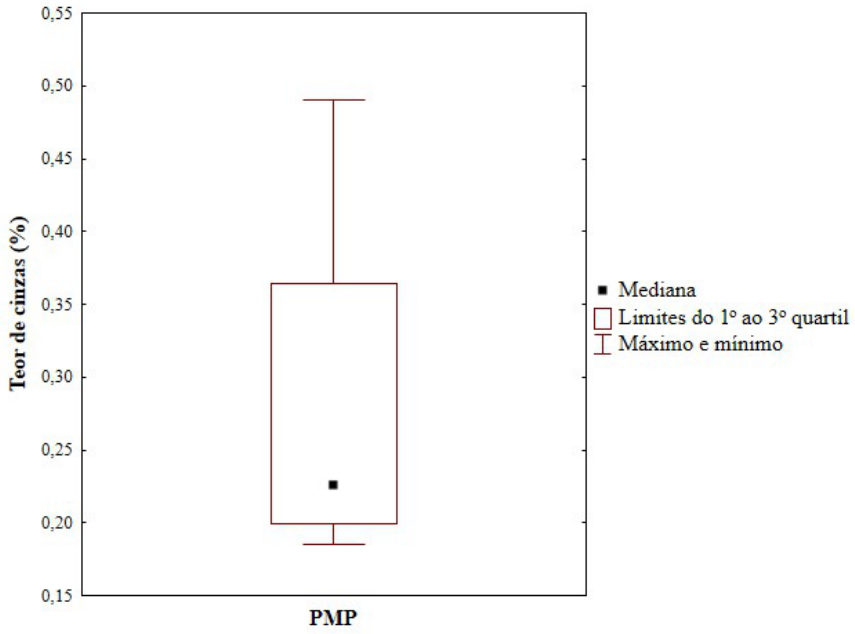
Fonte: O autor (2022).

Figura E-2: Distribuição dos valores de carbono fixo das amostras de pellets de maravalha de *Pinus*.



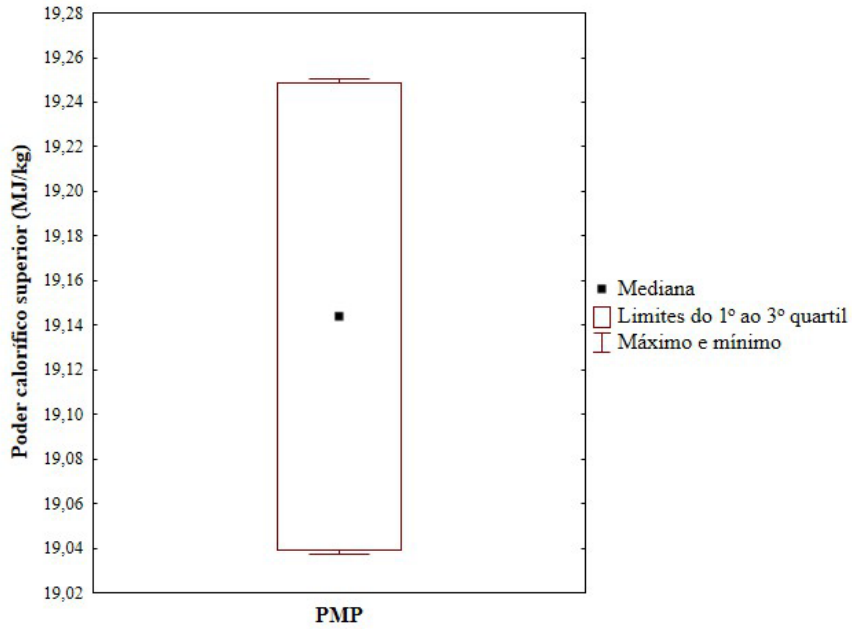
Fonte: O autor (2022).

Figura F-2: Distribuição dos valores de teor de cinzas das amostras de pellets de maravalha de *Pinus*.



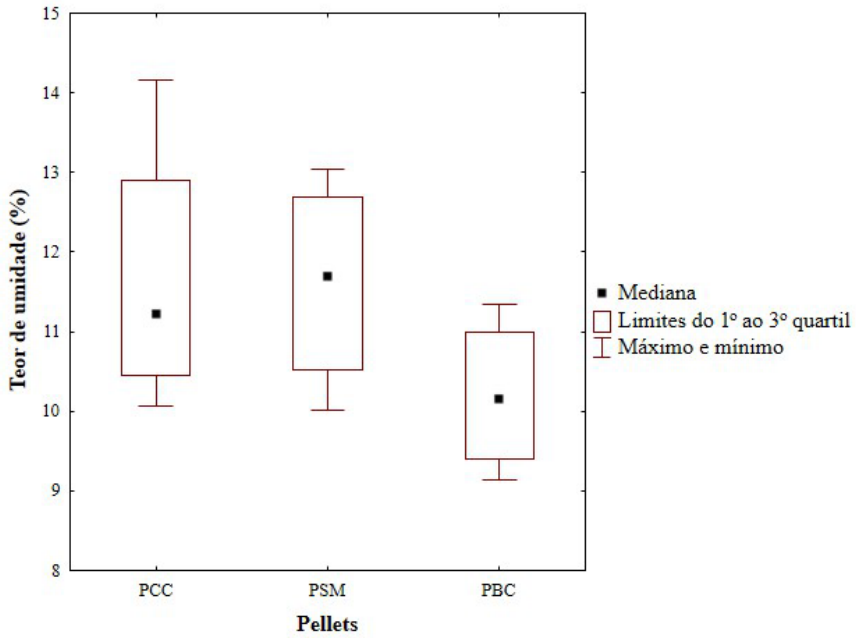
Fonte: O autor (2022).

Figura G-2: Distribuição dos valores de densidade a granel das amostras de pellets de maravalha de *Pinus*.



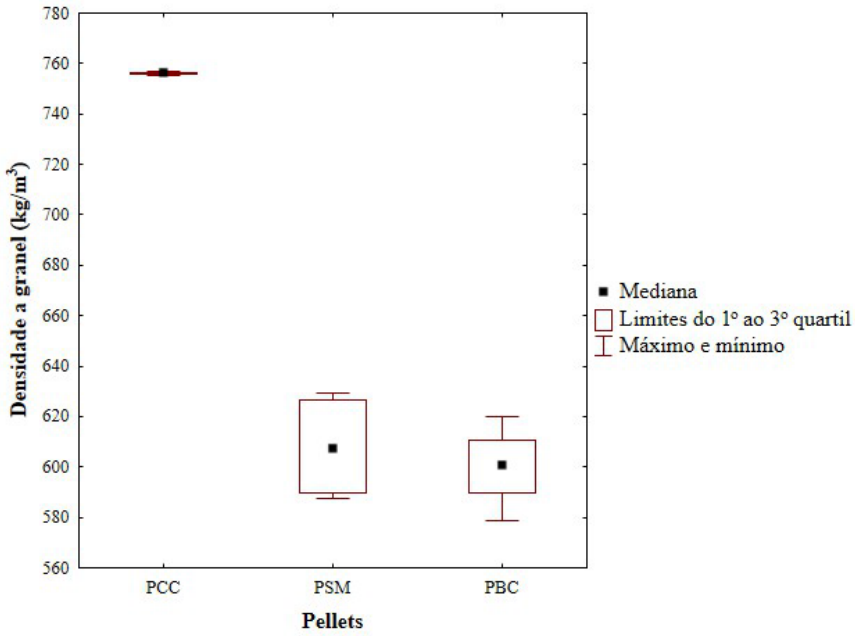
Fonte: O autor (2022).

Figura H-2: Distribuição dos valores de teor de umidade das amostras de pellets de materiais não-lenhosos.



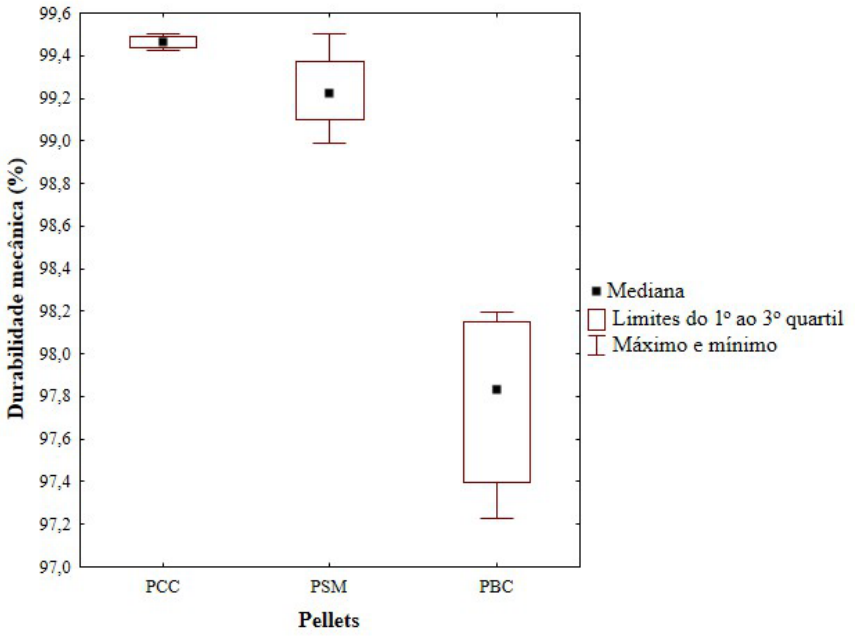
Fonte: O autor (2022).

Figura I-2: Distribuição dos valores de densidade a granel das amostras de pellets de materiais não-lenhosos.



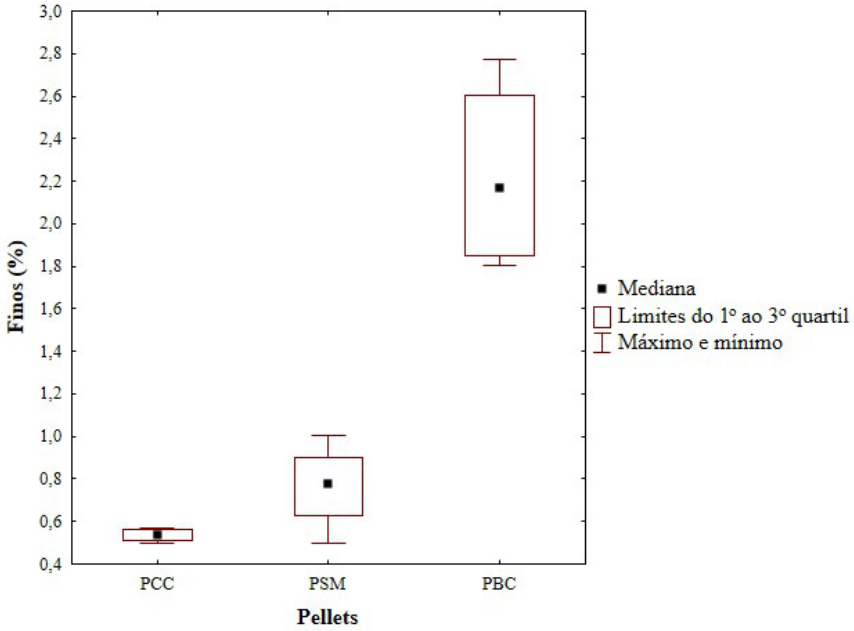
Fonte: O autor (2022).

Figura J-2: Distribuição dos valores de durabilidade mecânica das amostras de pellets de materiais não-lenhosos.



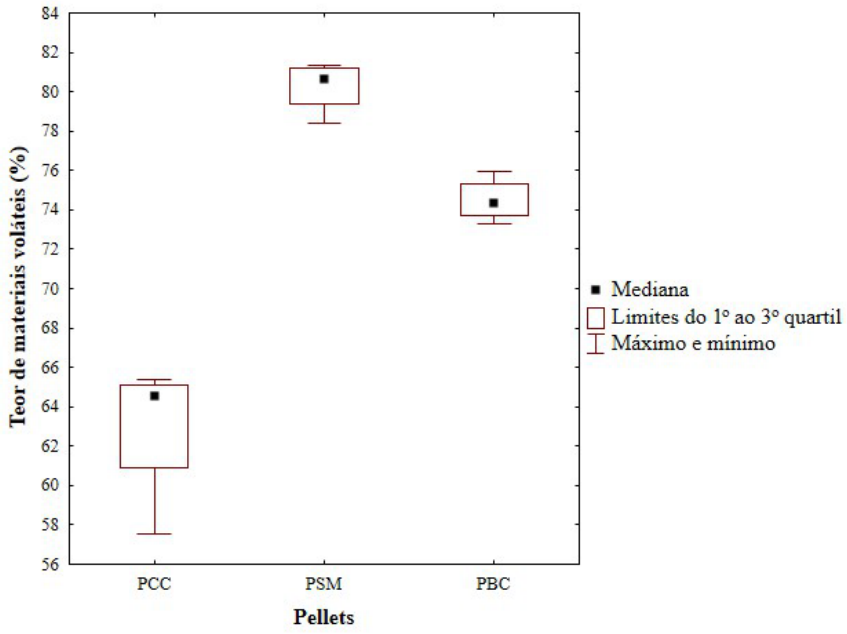
Fonte: O autor (2022).

Figura K-2: Distribuição dos valores de teor de finos das amostras de pellets de materiais não-lenhosos.



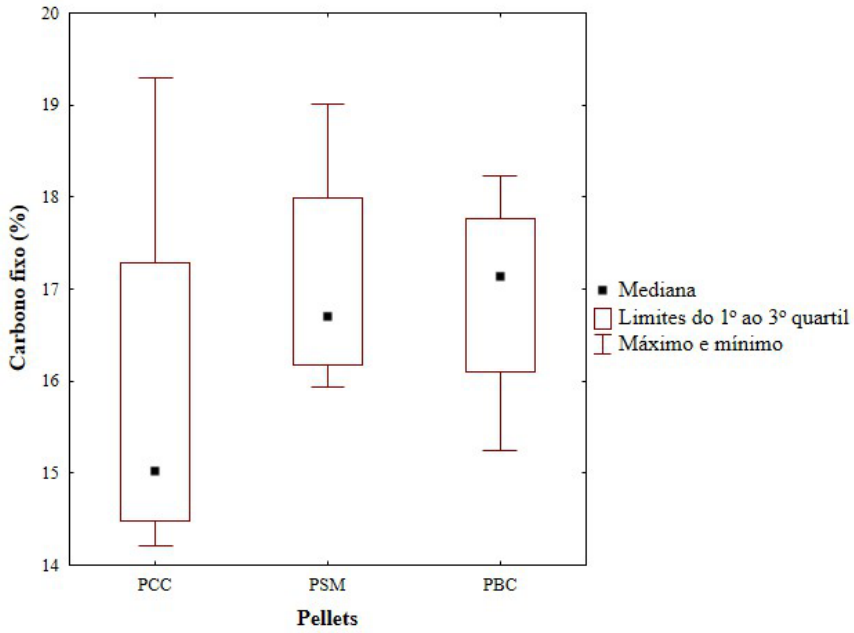
Fonte: O autor (2022).

Figura L-2: Distribuição dos valores de teor de materiais voláteis das amostras de pellets de materiais não-lenhosos.



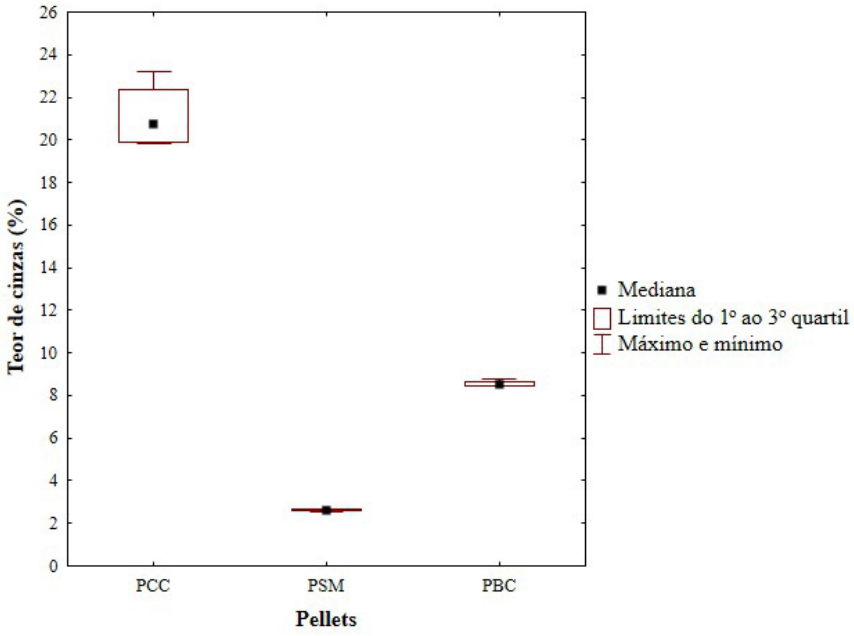
Fonte: O autor (2022).

Figura M-2: Distribuição dos valores de carbono fixo das amostras de pellets de materiais não-lenhosos.



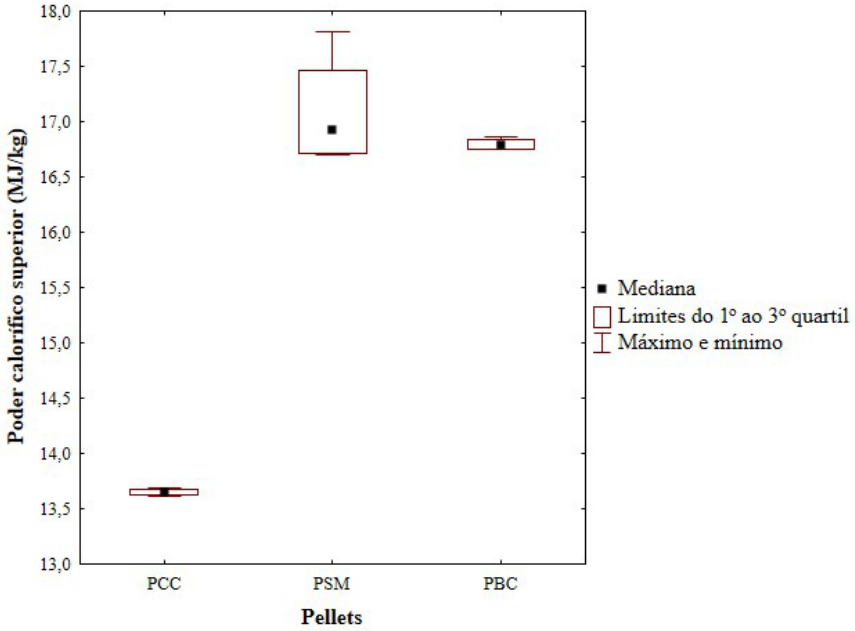
Fonte: O autor (2022).

Figura O-2: Distribuição dos valores de teor de cinzas das amostras de pellets de materiais não-lenhosos.



Fonte: O autor (2022).

Figura P-2: Distribuição dos valores de poder calorífico superior das amostras de pellets de materiais não-lenhosos.



Fonte: O autor (2022).

APÊNDICE III

Tabela A-3: Coeficientes de correlação entre as variáveis referentes aos parâmetros dos pellets de maravalha de Pinus.

Variáveis	$U_{(\%)}$	D_a	Dur	$F_{(\%)}$	TMV	TC	CF	PCS
$U_{(\%)}$	1,000	-0,997	-0,643	0,643	-0,099	-0,471	0,128	-0,988
D_a	-0,997	1,000	0,595	-0,595	0,077	0,431	-0,105	0,995
Dur	-0,643	0,595	1,000	-1,000	-0,175	0,319	0,139	0,5198
$F_{(\%)}$	0,643	-0,595	-1,000	1,000	0,175	-0,319	-0,139	-0,520
TMV	-0,099	0,077	-0,175	0,175	1,000	0,873	-0,999	0,131
TC	-0,471	0,431	0,319	-0,319	0,873	1,000	-0,891	0,450
CF	0,128	-0,105	0,139	-0,139	-0,999	-0,891	1,000	-0,157
PCS	-0,988	0,995	0,520	-0,520	0,131	0,450	-0,157	1,000

Significância: $p < 0,05$;
Onde: $U_{(\%)}$: teor de umidade (%); D_a: densidade a granel (Kg/m^3); Dur: durabilidade mecânica (%); $F_{(\%)}$: finos (%); TMV: teor de materiais voláteis (%); TC: teor de cinzas (%); CF: carbono fixo (%); PCS: poder calorífico superior (MJ/kg).
Fonte: o Autor (2022).

Tabela 5: Coeficientes de correlação e graus de significância entre as variáveis dos pellets de materiais não-lenhosos.

Variáveis	$U_{(\%)}$	D_a	Dur	$F_{(\%)}$	TMV	TC	CF	PCS
$U_{(\%)}$	1,0000 p= ---	,2837 p=,372	,4467 p=,145	-,4467 p=,145	-,0293 p=,928	,1051 p=,745	-,3797 p=,223	-,1533 p=,634
D_a	,2837 p=,372	1,0000 p= ---	,6364 p=,026	-,6364 p=,026	-,8830 p=,000	,9141 p=,000	-,3116 p=,324	-,9524 p=,000
Dur	,4467 p=,145	,6364 p=,026	1,0000 p= ---	-1,000 p=0,00	-,2713 p=,394	,3076 p=,331	-,2277 p=,477	-,4881 p=,107
$F_{(\%)}$	-,4467 p=,145	-,6364 p=,026	-1,000 p=0,00	1,0000 p= ---	,2713 p=,394	-,3076 p=,331	,2277 p=,477	,4881 p=,107
TMV	-,0293 p=,928	-,8830 p=,000	-,2713 p=,394	,2713 p=,394	1,0000 p= ---	-,9794 p=,000	,0773 p=,811	,9235 p=,000
TC	,1051 p=,745	,9141 p=,000	,3076 p=,331	-,3076 p=,331	-,9794 p=,000	1,0000 p= ---	-,2772 p=,383	-,9532 p=,000

CF	-,3797 p=,223	-,3116 p=,324	-,2277 p=,477	,2277 p=,477	,0773 p=,811	-,2772 p=,383	1,0000 p= ---	,3123 p=,323
PCS	-,1533 p=,634	-,9524 p=,000	-,4881 p=,107	,4881 p=,107	,9235 p=,000	-,9532 p=,000	,3123 p=,323	1,0000 p= ---

Significância estabelecida para o teste: $p < 0,05$;
Onde: $U_{(\%)}$: teor de umidade (%); D_a: densidade a granel (Kg/m^3); Dur: durabilidade mecânica (%); $F_{(\%)}$: finos (%); TMV: teor de materiais voláteis (%); TC: teor de cinzas (%); CF: carbono fixo (%); PCS: poder calorífico superior (MJ/kg).

Fonte: o Autor (2022).

Tabela C-3: Teste Levene de homogeneidade das variâncias dos pellets de materiais não-lenhosos.

Variáveis	SS error	Df error	MS error	F	p
$U_{(\%)}$	4,426	9	0,492	0,415	0,672
D_a	422,219	9	46,913	6,844	0,0156
Dur	0,118	9	0,013	9,714	0,006
$F_{(\%)}$	0,118	9	0,013	9,714	0,006
TMV	13,602	9	1,511	3,124	0,093
TC	1,358	9	0,151	11,950	0,002
CF	8,035	9	0,893	0,970	0,415
PCS	0,238	9	0,026	5,866	0,023

Onde: Erro de soma dos quadrados: SS error; Erro de graus de liberdade: Df error; Erro de quadrado das médias: MS error; F: teste F; p: significância (< 0,05); $U_{(\%)}$: teor de umidade (%); D_a: densidade a granel (Kg/m^3); Dur: durabilidade mecânica (%); $F_{(\%)}$: finos (%); TMV: teor de materiais voláteis (%); TC: teor de cinzas (%); CF: carbono fixo (%); PCS: poder calorífico superior (MJ/kg);

Fonte: o Autor (2022).

Tabela D-3: Teste Brown-Forsythe de homogeneidade da variância dos pellets de materiais não-lenhosos.

Variáveis	SS error	Df error	MS error	F	p
$U_{(\%)}$	5,447	9	0,605	0,311	0,740
D_a	434,683	9	48,298	6,711	0,016
Dur	0,133	9	0,015	8,616	0,008

$F_{(\%)}$	0,133	9	0,015	8,616	0,008
TMV	36,045	9	4,005	0,541	0,600
TC	1,957	9	0,217	8,307	0,009
CF	16,073	9	1,786	0,214	0,811
PCS	0,3443	9	0,038	4,046	0,056

Onde: Erro de soma dos quadrados: SS error; Erro de graus de liberdade: Df error; Erro de quadrado das médias: MS error; F: teste F; p: significância (< 0,05); $U_{(\%)}$: teor de umidade (%); D_a: densidade a granel (Kg/m^3); Dur: durabilidade mecânica (%); $F_{(\%)}$: finos (%); TMV: teor de materiais voláteis (%); TC: teor de cinzas (%); CF: carbono fixo (%); PCS: poder calorífico superior (MJ/kg);

Fonte: o Autor (2022).