



**RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS  
AGROFLORESTAIS POR MEIO DE PELETIZAÇÃO  
E TORREFAÇÃO**

**MYLA MEDEIROS FORTES**

**TESE DE DOUTORADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA-UnB**

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

**RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS**  
**AGROFLORESTAIS POR MEIO DE PELETIZAÇÃO E**  
**TORREFAÇÃO**

**MYLA MEDEIROS FORTES**

**ORIENTADOR: Dr. AILTON TEIXEIRA DO VALE**

**TESE DE DOUTORADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

**PUBLICAÇÃO: PPGEFL.TD-107/2022**

**BRASÍLIA – DF JUNHO DE 2022**

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

“ RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS AGROFLORESTAIS  
POR MEIO DE PELETIZAÇÃO E TORREFAÇÃO”

**MYLA MEDEIROS FORTES**

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTORA EM CIÊNCIAS FLORESTAIS.

APROVADA POR:

---

Prof. Dr. Ailton Teixeira do Vale (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB)  
(Orientador)

---

Prof. Dr. Joaquim Carlos Gonzalez (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB)  
(Examinador Interno)

---

Dr. Divino Eterno Teixeira (MAPA / Laboratório de Produtos Florestais)  
(Examinador Externo ao PPG-EFL)

---

Prof. Dr. Carlos Roberto Sette Jr (Escola de Agronomia / Universidade Federal de Goiás)  
(Examinador Externo à UnB)

---

Prof. Dr. Matheus Peres Chagas. (Escola de Agronomia / Universidade Federal de Goiás)  
(Examinador Externo ao PPG-EFL)

**BRASÍLIA/DF, 01 DE JUNHO DE 2022**

## FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade de Brasília.

Mr	Medeiros Fortes, Myla Recuperação Energética de Resíduos Agroflorestais por meio de Peletização e Torrefação / Myla Medeiros Fortes; orientador Ailton Teixeira do Vale. -- Brasília, 2022. 93 p.  Tese (Doutorado em Ciências Florestais) -- Universidade de Brasília, 2022.  1. Qualidade de pellet. 2. compactação de biomassa. 3. tratamento térmico. 4. ISO 17225-6. I. Teixeira do Vale, Ailton, orient. II. Título.
----	--

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FORTES, M. M. (2022). Recuperação Energética de Resíduos Agroflorestais por meio de Peletização e Torrefação. Tese de Doutorado em Ciências Florestais, Publicação PPGEFL.TD-107/2022. Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 93 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTORA: Myla Medeiros Fortes

TÍTULO: Recuperação Energética de Resíduos Agroflorestais por meio de Peletização e Torrefação

GRAU: Doutorado

ANO: 2022

É concedido à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem autorização por escrito da autora.

---

Myla Medeiros Fortes  
[medeirosmyla@gmail.com](mailto:medeirosmyla@gmail.com)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por tudo e por ter me capacitado a concluir mais uma etapa.

Ao meu orientador Dr. Ailton Teixeira do Vale pelas instruções, ensinamentos, conhecimento, apoio, comprometimento e amizade durante esta etapa.

Ao Professor Dr. Álvaro Nogueira de Souza pelos ensinamentos e amizade durante esta etapa.

À minha mãe, pai, irmãos, familiares e amigos que sempre torceram por mim.

Ao Técnico MSc. Vandui Francisco pela atenção e ajuda no desenvolvimento dos meus ensaios laboratoriais.

Ao Laboratório de Qualidade da madeira e bioenergia da Universidade Federal de Goiás, ao Professor Dr. Carlos Sette e ao Técnico M.Sc. Macksuel Fernandes pela atenção e espaço concedido para desenvolver meus ensaios laboratoriais.

Ao Laboratório de Produtos Florestais do Serviço Florestal Brasileiro, em especial ao Laboratório de Bionergia, e aos servidores Bruno Chaves, Gustavo Galvão, Lucélia e Greg, pela atenção e espaço concedido para desenvolver meus ensaios laboratoriais. Ao Laboratório de Química, e aos servidores Dr. Alessandro César e a Dhébora pelo acompanhamento nas análises químicas.

A Universidade de Brasília (UnB), Campus Darcy Riberio e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais (PPGEFL) pelo acolhimento e formação.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro.

Aos demais professores do Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais da UnB pelas instruções, ensinamentos e apoio. E aos meus amigos Niliane Campos, Máira Beatriz, Adrianna Amorim, Carlos Magno, Juliano Miranda, Yanara Souza, Michelle Foncesa, Ravana Marques, Fernanda Borgis, Alexandre Ferreira, Mario Lima, Mirian Costa, Bruna Amoras e Macksuel Fernandes e a todos que direta ou indiretamente contribuíram para realização deste trabalho.

A todos vocês, muito obrigada!

## RESUMO

### RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS AGROFLORESTAIS POR MEIO DE PELETIZAÇÃO E TORREFAÇÃO

Autor: Myla Medeiros Fortes

Orientador: Ailton Texeira do Vale

Programa de Pós graduação em Ciências Florestais

Brasília, 01 de Junho de 2022

A matriz energética mundial é baseada principalmente no uso de combustíveis fósseis, importantes contribuintes para o efeito estufa. Uma alternativa para aumentar a energia térmica dos resíduos agroflorestais, por unidade de volume, é a peletização, processo que tem contribuído para minimizar problemas relacionados à emissão de gases de efeito estufa. Outra via de conversão é na forma de tratamento térmico a temperaturas relativamente baixas conhecida como torrefação com a finalidade de produzir um combustível com maior densidade energética. Este trabalho tem como objetivo avaliar o potencial de alguns resíduos agroflorestais para serem utilizados no processo de peletização e torrefação, com foco na geração de energia e na classificação desses resíduos conforme um padrão de comercialização. Os resíduos utilizados, provenientes de sobras de lavouras de feijão, soja, girassol, algodão e uma mistura de maravalha de pinus + resíduo de girassol foram caracterizados e utilizados na produção de *pellets* e posteriormente submetidos ao processo de torrefação. Sendo então comparados frente ao processo de peletização e torrefação. Os resíduos do algodoeiro apresentaram características químicas mais atrativas, como alto teor de lignina, resultando em *pellets* não torrados com maiores valores de densidade a granel ( $636 \text{ kg m}^{-3}$ ), o que também aconteceu para os *pellets* não torrados produzidos com os resíduos de feijoeiro que também tiveram maiores valores de densidade a granel ( $619 \text{ kg m}^{-3}$ ) e menores teores de finos (0,18%). Nessas condições, ambos os resíduos atenderam aos requisitos internacionais para uso residencial e comercial, tudo de acordo com o que é preconizado na norma ISO 17225 - 6 (Tipo A). Os *pellets* torreficados de algodoeiro alcançaram maior ganho com o processo de torrefação, sendo superior aos demais. Misturar biomassa agrícola e florestal permite gerar melhorias nas propriedades energéticas (cinzas e poder calorífico). A torrefação promoveu o aumento do poder calorífico superior e conseqüentemente da densidade energética e redução da umidade dos pellets e a peletização gerou ganhos em densidade a granel. Concluindo que é viável tecnicamente a utilização dos resíduos agroflorestais como biocombustível sólido na forma de *pellet* não torrado e de *pellet* torrado.

Palavras-chave: Qualidade de *pellet*, compactação de biomassa, tratamento térmico, ISO 17225-6.

## ABSTRACT

### ENERGY RECOVERY OF AGROFORESTRY WASTE THROUGH PELLETIZING AND ROASTING

Author: Myla Medeiros Fortes

Advisor: Ailton Texeira do Vale

Forest Science Graduate Program

Brasilia, June 1<sup>st</sup>, 2022

The world energy matrix is mainly based on the use of fossil fuels, important contributors to the greenhouse effect. An alternative to increase the thermal energy of agroforestry residues, per unit of volume, is pelleting, a process that has contributed to minimize problems related to the emission of greenhouse gases. Another route of conversion is in the form of heat treatment at relatively low temperatures known as roasting in order to produce a fuel with greater energy density. This work aims to evaluate the potential of some agroforestry residues to be used in the pelletizing and roasting process, focusing on energy generation and classification of these residues according to a commercialization standard. The residues used, from leftovers from bean, soy, sunflower, cotton and a mixture of pine shavings + sunflower residue were characterized and used in the production of pellets and later submitted to the roasting process. Being then compared against the process of pelletizing and roasting. Cotton residues showed more attractive chemical characteristics, such as high lignin content, resulting in unroasted pellets with higher bulk density values ( $636 \text{ kg m}^{-3}$ ), which also happened for unroasted pellets produced with cotton residues. Beans that also had higher bulk density values ( $619 \text{ kg m}^{-3}$ ) and lower fines contents (0.18%). Under these conditions, both residues met international requirements for residential and commercial use, all in accordance with what is recommended in the ISO 17225 - 6 (Type A) standard. The roasted cotton pellets achieved greater gain with the roasting process, being superior to the others. Mixing agricultural and forestry biomass allows to generate improvements in energy properties (ash and calorific value). The roasting promoted an increase in the higher calorific value and, consequently, in the energy density and reduction in the humidity of the pellets, and the pelletization generated gains in bulk density. Concluding that it is technically feasible to use agroforestry residues as solid biofuel in the form of unroasted pellets and roasted pellets.

Keywords: *Pellet* quality, biomass compaction, thermal treatment, ISO 17225-6.

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	13
<b>2. OBJETIVO</b> .....	17
Objetivos específicos:.....	17
<b>3. HIPÓTESE</b> .....	17
<b>4. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	18
<b>4.1. Resíduos sólidos agrofloretais</b> .....	18
<b>4.1.1. Resíduo de Feijoeiro</b> .....	18
<b>4.1.2. Resíduo de Soja</b> .....	18
<b>4.1.3. Resíduo de Algodoeiro</b> .....	19
<b>4.1.4. Resíduo de Girassol</b> .....	20
<b>4.1.5. Maravalha de Pinus</b> .....	20
<b>4.2. Peletização</b> .....	20
<b>4.3. Torrefação</b> .....	23
<b>5. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	24
<b>5.1. Coleta e preparo dos resíduos agrofloretais</b> .....	24
<b>5.2. Caracterização dos resíduos agrofloretais</b> .....	26
<b>5.2.1. Determinação do teor de umidade dos resíduos agrofloretais</b> .....	27
<b>5.2.2. Determinação da Classificação Granulométrica e da densidade do granel dos resíduos agrofloretais</b> .....	27
<b>5.2.3. Determinação da Análise Imediata dos resíduos agrofloretais</b> .....	28
<b>5.2.4. Determinação da análise elementar dos resíduos agrofloretais</b> .....	31
<b>5.2.5. Determinação do Poder Calorífico dos resíduos agrofloretais</b> .....	31
<b>5.2.6. Determinação da densidade energética dos resíduos agrofloretais</b> .....	33
<b>5.2.7. Determinação da análise química dos resíduos agrícolas (Algodoeiro, feijoeiro, girassol e soja)</b> .....	33
<b>5.3. Fabricação dos <i>pellets</i> de resíduos agrofloretais</b> .....	38
<b>5.4. Torrefação dos <i>pellets</i> de resíduos agrofloretais</b> .....	38

5.5. Caracterização dos <i>pellets</i> não torrados e torrados.....	40
5.6. Classificação dos <i>pellets</i> não torrados.....	42
5.7. Determinação dos rendimentos gravimétrico e energéticos dos <i>pellets</i> torrados .....	42
5.8. Análises estatísticas dos tratamentos (Resíduos <i>in natura</i> , <i>pellets</i> não torrados e <i>pellets</i> torrados).....	43
5.9. Determinação dos ganhos e perdas dos resíduos frente aos tratamentos de peletização e torrefação .....	44
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>44</b>
<b>6.1. CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS AGROFLORESTAIS PARA FINS ENERGÉTICOS.....</b>	<b>45</b>
6.1.1. Teor de umidade dos resíduos agroflorestais.....	45
6.1.2. Classificação granulométrica dos resíduos agroflorestais .....	46
6.1.3. Densidade a granel dos resíduos agroflorestais .....	47
6.1.4. Análise imediata dos resíduos agroflorestais .....	49
6.1.5. Análise elementar dos resíduos agroflorestais .....	50
6.2.6. Análise química dos resíduos agroflorestais .....	51
6.1.7. Poder calorífico superior, poder calorífico inferior, poder calorífico útil e densidade energética dos resíduos agroflorestais .....	53
<b>6.2. CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE PELLETS NÃO TORRADOS DE RESÍDUOS AGROFLORESTAIS .....</b>	<b>55</b>
<b>6.3. CARACTERIZAÇÃO DE PELLETS TORRADOS DE RESÍDUOS AGROFLORESTAIS.....</b>	<b>61</b>
<b>6.4. COMPORTAMENTO DOS RESÍDUOS FRENTE AO PROCESSO DE PELETIZAÇÃO E DE TORREFAÇÃO .....</b>	<b>71</b>
<b>CONCLUSÃO GERAL .....</b>	<b>73</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>74</b>

## LISTAS DE TABELAS

Tabela 1. Especificações de qualidade exigidos para pellets oriundos de biomassa não lenhosas, segundo a norma ISO 17225-6, para aplicações industriais e domésticas. (ISO 17225-6, 2014). .....	22
Tabela 2. Teor de umidade (TU) médio de resíduos agroflorestais estudados. ....	46
Tabela 3. Valores médios dos teores de extrativos, cinzas sem extrativos, holocelulose e lignina insolúvel, solúvel e total dos resíduos agrícolas. ....	52
Tabela 4. Poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI), poder calorífico útil (PCU) e densidade energética (Deg) dos resíduos agroflorestais. ....	54
Tabela 5. Especificações de qualidade exigidos para pellets não lenhosos, segundo a norma ISO 17225-6, para aplicações industriais e domésticas. ....	56
Tabela 6. Densidade aparente (Da) e taxa de compactação de pellets não torrados proveniente de resíduos agroflorestais in natura. ....	59
Tabela 7. Poder calorífico superior (PSC) e Poder calorífico útil (PCU) de pellets não torrados proveniente de resíduos agrícolas in natura. ....	60
Tabela 8. Valores médios das propriedades físicas e energéticas de pellets torrados oriundos de resíduos agroflorestais. ....	62
Tabela 9. Rendimento de massa e energia para pellets torrados em temperatura final de 250°C, taxa de aquecimento de 5°C/min e tempo de residência de 30 minutos. ....	67
Tabela 10. Densidade aparente (DA), poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico útil (PCU) de pellets torrados. ....	68
Tabela 11. Modificações nas características dos resíduos quando peletizados. ....	71

## LISTAS DE FIGURAS

- Figura 1. Resíduos agroflorestais após coleta em campo. A) de Feijoeiro B) de Algodoeiro C) de Soja D) de girassol e E) maravalha de pinus. .... 25
- Figura 2. Preparo do resíduo do algodão: A) plantio. B) coleta. C) secagem. D) resíduo seco em estufa por 24 horas. E) resíduo triturado. F) resíduo moído com umidade de equilíbrio higroscópico. .... 26
- Figura 3. Resíduos agroflorestais moídos e na umidade de equilíbrio higroscópico. A) de Algodoeiro (100%), B) de Girassol (100%), C) Mistura (50% de maravalha de Pinus + 50% de Girassol), D) de Feijoeiro (100%) e E) de Soja (100%). .... 26
- Figura 4. Classificação Granulométrica. A) Agitador eletro-magnético de peneiras. .... 28
- Figura 5. Sequência para obtenção de dados para a determinação do teor de materiais voláteis: A) amostras no interior da mufla. B) amostras no dessecador. .... 29
- Figura 6. Sequência para obtenção de dados para a determinação do teor de cinzas: A) amostras inseridas na Mufla. B) amostras em dessecador após ensaio. C) cinzas de biomassa de Girassol. .... 30
- Figura 7. Analisador elementar CHNS Perkin Elmer modelo EA 2400. Fonte: [www.caiq.unb.br](http://www.caiq.unb.br) ..... 31
- Figura 8. Determinação do poder calorífico. A) Bomba calorimétrica. .... 32
- Figura 9. Retirada dos extrativos dos resíduos. A) extrator. B) processo de extração. C) balões com extrativos (girassol, algodão, soja e feijão) após secagem. .... 34
- Figura 10. Teor de cinzas: A) de algodão e soja. B) de girassol e feijão. C) resíduos livres de extrativos. .... 35
- Figura 11. Processo de isolamento da lignina ácida solúvel e insolúvel: A) frasco de reação com as amostras e o ácido. B) frasco de reação em banho maria. C) proveta com 84 ml de água deionizada. D) frasco de reação com amostra, ácido e água. E) frasco de reação em autoclave. F) cadinhos filtrantes com parcela sólida. .... 36
- Figura 12. Análise da Lignina solúvel: A) parcela líquida da amostra de lignina em kitassato. B) amostra com diluição adequada em cubeta. C) espectrofotômetro utilizado. .... 37
- Figura 13. Processo de produção dos pellets: A) matriz com forma circular com orifícios de 6 mm de diâmetro. B) comando de alimentação. C) formação dos pellets. D) pellets em resfriamento. .... 38

Figura 14. Esquema do reator de torrefação: 1) cilindro de nitrogênio; 2) válvula solenoide de controle do fluxo N <sub>2</sub> ; 3) Balança; 4) Amostra; 5) Reator de Torrefação (Estufa adaptada); 6) Bomba de fluxo; 7) Controlador do nível de N <sub>2</sub> ; 8) Quadro de comando; 9) Gantner (comunicação com o CPU); 10) Computador (Labview). Fonte: Edgar Amaral Silveira, Doutor em Ciências Mecânicas – Unb.....	39
Figura 15. Produção dos pellets torrados: A) determinação dos patamares de torrefação. B) pellets no interior do reator. C) pellets torrados de soja.....	40
Figura 16. Caracterização dos pellets: A) determinação da durabilidade. B) determinação da densidade aparente. ....	41
Figura 17. Resíduos agroflorestais moídos e na umidade de equilíbrio higroscópico. A) de Algodoeiro (100%), B) de Girassol (100%), C) Mistura (50% de maravalha de Pinus + 50% de Girassol), D) de Feijoeiro (100%) e E) de Soja (100%).....	45
Figura 18. Classificação granulométrica (%) dos resíduos agroflorestais. Mistura: girassol/maravalha de pinus.....	47
Figura 19. Densidade a granel (D <sub>g</sub> ) médio de resíduos agroflorestais estudados. Mistura: girassol/ maravalha de pinus. ....	48
Figura 20. Teor de cinzas (CZ), material volátil (MV) e carbono fixo (CF) médio dos resíduos agroflorestais. Mistura: girassol/ maravalha de pinus.....	50
Figura 21. Teor de carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio dos resíduos agroflorestais. Mistura: girassol/ maravalha de pinus.....	51
Figura 22. Pellets não torrados: de Algodoeiro (100%), Girassol (100%), Feijoeiro (100%), Soja (100%) e Mistura (50% de maravalha de Pinus e 50% de Girassol). ....	56
Figura 23. Densidade energética a granel e sólida de pellets não torrados. Obs: Médias seguidas da mesma letra, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p > 0,05). Mistura: girassol/ maravalha de pinus. ....	61
Figura 24. Pellets torrados: de Algodoeiro, Girassol, Feijoeiro, Soja e Mistura (50% de maravalha de Pinus e 50% de Girassol). ....	62
Figura 25. Teor de cinzas (CZ), material volátil (MV) e carbono fixo (CF) de pellets torrados. Mistura: girassol/ maravalha de pinus.....	66
Figura 26. Teor de carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio de pellets torrados. Mistura: girassol/ maravalha de pinus. ....	69
Figura 27. Densidade energética a granel e sólida de pellets torrados. Obs: Médias seguidas da mesma letra, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p > 0,05). Mistura: girassol/ maravalha de pinus. ....	71

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

Com o aumento da população global e dos padrões de vida em todo o mundo nas últimas décadas houve crescimento significativo na demanda de energia que sobrecarrega as reservas de combustíveis fósseis e gera alta emissão de gases de efeito estufa (GEE). Neste sentido aparecem oportunidades para o desenvolvimento energias renováveis e combustíveis alternativos de baixo custo e tecnologicamente confiáveis. Dessa forma a energia de biomassa ou a bioenergia é um dos recursos promissores para atender aos requisitos de demanda e reduzir as emissões de GEE (CHEN et al., 2015). A biomassa é considerada um combustível neutro em carbono, pois não há adição líquida de dióxido de carbono na atmosfera (SAIDUR et al., 2011).

Atualmente a matriz energética do Brasil é constituída de 48,4 % de fontes renováveis, destacando com uma das mais limpas do mundo. A média mundial considerando outros países está em torno de 13,8% (BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL, 2021).

Dentre as fontes de energia renovável, a biomassa vegetal agrícola e florestal é fonte importante para a geração de energia térmica e também elétrica. Uma das fontes de biomassa é o resíduo agrícola com elevada produção oriunda das colheitas das culturas agrícolas, fornecendo grandes volumes de biomassa com boas propriedades energéticas. Porém possuem baixa densidade tornando o transporte inviável economicamente, até o ponto de uso para produção de energia e, portanto, um combustível ideal para a densificação antes do uso final (BAJWA et al., 2018).

Dessa forma, os resíduos são uma expressiva fonte de biomassa para gerar energia, em todo o mundo apresenta alto potencial para sua obtenção sob adequada exploração (CORTEZ et al., 2011). Os resíduos provenientes de culturas agrícolas são tradicionalmente incorporados ao solo promovendo assim, a ciclagem dos nutrientes utilizados no crescimento da planta, por outro lado, o gerenciamento inadequado pode gerar contaminação do solo e de corpos d'água. A biomassa residual de atividades agrícolas ainda é subutilizada, com exceção do bagaço de cana-de-açúcar (DURÃES et al., 2012), mas pode ser uma renda adicional com benefícios ambientais (OLIVEIRA, 2015; GARCIA et al., 2018), se utilizadas adequadamente.

O Brasil é um dos maiores produtores agrícolas e florestais do mundo (DIAS et al., 2012), sendo o 3º maior produtor de feijão (*Phaseolus vulgaris*, L.) (FAOSTAT, 2019), com

produção de 3,0 milhões de toneladas e área plantada de 2,9 milhões hectares (CONAB, 2019), gerando, no processamento, 11 milhões de toneladas de resíduos constituídos da palha e outros resíduos (ABIB, 2011).

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) também é uma oleaginosa de grande importância no Brasil, destacando-se como principal produto agrícola exportado com produção de 114 milhões de toneladas e área plantada de 35 milhões de hectares (CONAB, 2019), gerando cerca de 3,0 a 4,0 toneladas de resíduos da biomassa vegetal (NOGUEIRA et al., 2000).

O algodoeiro herbáceo (*Gossypium hirsutum* L.) é a principal matéria-prima da indústria têxtil brasileira e mundial, com produção de 2,7 milhões de toneladas de pluma e área plantada correspondente de 1,6 milhão de hectare (CONAB, 2019) gerando, no processamento, 6,6 milhões de toneladas de resíduos por ano, provenientes de rama (hastes e capulho) conforme a produção de 2019 (ABIB, 2011).

O girassol (*Helianthus annuus* L.) é uma oleaginosa com área plantada de 65,8 milhões de hectares e produção 116 milhões de toneladas (CONAB, 2019), gerando cerca de 3,0 a 5,0 toneladas de restos culturais oriundos de hastes e folhas (GAZZOLA et al., 2012), usados para silagem (AMABLE et al., 2002).

O pinus é uma espécie florestal exótica possui área plantada de 1,7 milhão de hectare e produção 25,84 milhões de toneladas (IBÁ, 2021) gerando, no processamento, 5,17 milhões de toneladas de resíduos de maravalha, que corresponde 20% do volume total da matéria prima (HÜEBLIN, 2001).

O uso de resíduos como combustível dependente da disponibilidade considerando as restrições ecológicas, econômicas (sociais e políticas) e tecnológicas (NOGUEIRA et al., 2000). As restrições ecológicas estão associadas à preservação do meio ambiente e à qualidade de vida; econômicas, se há possibilidade de usos não energéticos como alimentício ou industrial, e se os custos de produção são compatíveis com os benefícios energéticos em relação a outros combustíveis; tecnológicas, se há processos e operações confiáveis para conversão de biomassa em combustível e se as propriedades energéticas da biomassa são favoráveis (FERNANDES et al., 2013; VALE et al., 2011).

Diversos estudos avaliaram a viabilidade técnica do uso de resíduos para a fabricação produção de biocombustíveis sólidos de alto valor agregado. De Moraes et. al. (2019) avaliaram briquetes produzidos com serragem de pinus, Sette Jr et al. (2020) analisaram briquetes produzidos com resíduos de eucalipto e acácia e Souza et al. (2020) avaliaram briquetes produzidos com resíduos da poda urbana, lodo de flotação e embalagens cartonadas.

A produção de energia por meio dos próprios resíduos contribui para a economia circular, promovendo conservação de recursos naturais e reduzindo os impactos negativos em toda cadeia produtiva. Tais práticas estão de acordo com os princípios de Environmental, Social and Governance (ESG), conjunto de valores corporativos adotados pelo Pacto Global das Nações Unidas, que visa promover o desenvolvimento econômico com responsabilidade ambiental, social e de governança. Tal prática também se alinha ao objetivo do desenvolvimento sustentável 7, meta 2 (ODS-7.2), que propõe aumentar a participação das energias renováveis na matriz energética mundial.

Um dos processos de densificação é a peletização que é um tratamento mecânico viável para transformar fisicamente o material lignocelulósico particulado em um biocombustível sólido (PROTÁSIO et al., 2015). Neste processo, biomassa é pressionada por roletes em canais de compressão cilíndricos, convertendo-a em material aglomerado devido ao amolecimento térmico da lignina a qual promove a aglutinação das partículas (STELTE et al., 2012). Melhorando a propriedades do combustível e a densidade aparente (LIU et al., 2014), reduzindo o volume total de biomassa e assim, facilitando o manuseio, transporte e armazenamento (PODDAR et al., 2014).

O Processo de peletização aumenta a densidade aparente da biomassa de valor inicial de 40-200 kg.m<sup>-3</sup> para densidade final de 600-800 kg.m<sup>-3</sup> (OBERNBERGE; THEK, 2004), sendo ideal para biomassa de baixa densidade, como os resíduos agrícolas (BAJWA et al, 2018). As biomassas mais comuns utilizadas para peletização são resíduos da indústria da madeira, resíduos agrícolas e florestais (XIÃO et al, 2015), que, na forma peletizada pode ser utilizada com maior eficiência na geração de calor para o aquecimento e produção de eletricidade, além de diminuir os custos de transporte e de armazenamento (ZUWAŁA, 2012; GOKCOL et al, 2009).

Os *pellets* estão entre as fontes de energia de biomassa mais utilizadas em todo o mundo (TOSCANO et al., 2013; ARRANZ et al., 2015). A produção de *pellets* do Brasil totaliza-se 506 mil toneladas por ano em 2020 conforme a Faostat (2022). Os *pellets* gerados são fáceis de queimar devido à grande área superficial e melhor transferência de calor, utilizados principalmente em fogões de aquecimento doméstico e caldeiras de aquecimento (BAJWA et al, 2018). Os *pellets* de madeira de resíduos florestais já estão estabelecidos do ponto de vista tecnológico de mercado, sendo interessante o desenvolvimento de *pellets* oriundos de biomassa não lenhosa como uma opção para produção energética (BARBANERA et al, 2016).

Os resíduos não lenhosos são considerados de baixo custo, além de serem renováveis. No entanto, há questões a serem resolvidas, como a logística da cadeia de suprimentos, disponibilidade de biomassa e demanda do mercado que desempenham importante papel no sistema de transformação de biomassa em bioenergia (GARCIA-MARAVÉ et al, 2015). Juntamente com a biomassa lenhosa, estes resíduos podem reduzir a dependência de combustíveis fósseis e ajudar a mitigar as ameaças à segurança ambiental e econômica (BAJWA et al, 2018).

O Brasil não apresenta norma que regulamente a qualidade dos *pellets*, entretanto muitos países europeus (Itália, Alemanha, Áustria e Suécia) desenvolveram seus próprios padrões de qualidade para a combustão, armazenamento e transporte desses biocombustíveis. Com a finalidade de unificar a certificação nestes mercados, foi criado o conjunto de normas internacionais ISO 17225 (2014), contendo partes de 1 a 8, em que a nova legislação fornece os padrões de qualidade limites para os produtos densificados (*pellets*, briquetes industrial e não industrial) produzidos por qualquer biomassa vegetal. Sendo a ISO 17225 – 2 para *pellets* de madeira e a ISO 17225 – 6 para *pellets* não lenhosos oriundos de resíduos agrícolas.

Outro tipo de via de conversão é a torrefação que é o tratamento térmico a temperaturas até 300°C, com finalidade de produzir um combustível com maior densidade energética em relação ao *in natura* (CHEN et al., 2015). O princípio fundamental é a degradação preferencial e seletiva da fração calorífica inferior, a qual resulta na degradação de alguns compostos extrativos, e de polissacarídeos, principalmente do grupo das hemiceluloses, dessa forma permitindo o aumento da proporção de compostos com maior teor de carbono e energia, maior estabilidade térmica e menor capacidade de adsorção de água (DA SILVA et al., 2016; DA SILVA et al., 2018).

A torrefação e a peletização são métodos relevantes para a produção de combustível sólido, permitindo melhorar as propriedades da biomassa e aumentar seu potencial para aplicação industrial (CHEN et al., 2015). Podendo a torrefação ser um pré ou pós-processamento na densificação de biomassa para melhorar o comportamento de oxidação térmica (BAJWA et al., 2018). A combinação dos métodos melhora o processo e o rendimento da biomassa (LI et al., 2012), melhora também a densidade aparente e energética e a hidrofobicidade e por fim, contribui para a eficiência de conversão energética e logística (PIRRAGLIA et al, 2013; NUNES et al., 2014). Dessa forma os *pellets* torreficados (TOP) podem tornar-se um commodity de biomassa sólida dominante e de preferência do comércio internacional em um futuro próximo (LAMERS et al., 2016).

Conforme estudos, a densificação de biomassa torrificada é mais exigente sob as mesmas condições operacionais usadas para a densificação de biomassa *in natura* (PIMCHUAI et al., 2010; OHLIGER et al., 2013). As exigências são, alta pressão de compressão e alta temperatura da matriz para produzir *pellets* torrados de qualidade semelhante aos *pellets* não torrados (CHEN et al., 2015).

## 2. OBJETIVO

O objetivo geral do trabalho consiste em verificar a viabilidade técnica da utilização dos resíduos agroflorestais como biocombustível sólido na forma de *pellet* não torrado e *pellet* torrado (ou torrificado), visando a geração de subprodutos energéticos de alto valor agregado.

Objetivos específicos:

- Determinação das propriedades físicas, químicas e energéticas dos resíduos na condição *in natura*, convertidos em *pellets* não torrado e *pellets* torrado.
  - Avaliar o potencial dos resíduos agroflorestais (100% feijoeiro, 100% soja, 100% algodoeiro, 100% girassol e 50% de maravalha de pinus + 50% resíduo de girassol) para uso em processos de adensamento por peletização.
  - Caracterizar e classificar física e energeticamente os *pellets* não torrados e torrados oriundos de resíduos agrícolas *in natura* e mistura de resíduos.
- Comparação entre os tipos de resíduos e entre os tipos de transformações.
  - Determinar os ganhos e perdas dos tratamentos e dos resíduos frente ao processo de peletização e torrefação e visualizar os melhores tratamentos através de características físicas e energéticas dos resíduos, dos *pellets* não torrados e *pellets* torrados.

## 3. HIPÓTESE

É tecnicamente viável a conversão dos resíduos agroflorestais em *pellets* não torrado e torrado para uso como insumo energético.

## **4. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **4.1. Resíduos sólidos agroflorestais**

Anualmente, em muitos países de clima tropical e contendo grandes áreas de cultivo, são geradas enormes quantidades de resíduos lignocelulósicos (DIAS et al., 2012). Caracterizados como resíduos vegetais que apresentam em sua constituição lignina e celulose, juntamente com outros componentes, como as hemiceluloses e os extrativos (PAULA et al, 2011a).

Grande parte das biomassas agrícolas e florestais vem sendo utilizada no meio rural com baixa eficiência energética na produção de energia elétrica ou na produção de calor para secagem de produtos agrícolas (SILVA et al., 2004). No uso dos resíduos de origem vegetal para a produção de energia, é importante o conhecimento de algumas propriedades e, neste sentido, faz-se necessário a realização de análises físico-químicas e energéticas para melhor caracterização do material a ser utilizado (VALE; GENTIL, 2008).

#### **4.1.1. Resíduo de Feijoeiro**

O feijão comum (*Phaseolus vulgaris*, L.) é uma das principais fontes de proteína e de ferro, além de outros nutrientes, alimento de fácil acesso e preparo (SILVA et al., 2009). É uma das leguminosas mais cultivadas no mundo, sendo o Brasil o 3º maior produtor (FAOSTAT, 2019), com produção de 3,1 milhões de toneladas e área plantada de 2,9 milhões hectares (CONAB, 2019), gerando, no processamento, 11 milhões de toneladas de resíduos constituídos da palha e resíduos (ABIB, 2011).

A geração de resíduo de feijão comum para o Brasil foi equivalente a 11 milhões de toneladas de palhas e resíduos nas três safras. A região com maior geração de resíduo foi a sul apresentando valor de 2,9 milhões de toneladas, seguida da região sudeste com 2,7 milhões de toneladas. Em relação aos estados, o Paraná apresentou a maior geração, com valor de 2,2 milhões de toneladas, seguido de Minas Gerais 1,9 milhão de toneladas (CONAB, 2019; ABIB, 2011).

#### **4.1.2. Resíduo de Soja**

A soja (*Glycinemax* (L.) Merrill) é uma oleaginosa de grande importância no Brasil, destacando-se como principal produto agrícola exportado com produção de 114 milhões de toneladas e área plantada de 35 milhões de hectares (CONAB, 2019). Com esta grande produção estima-se que a cultura da soja produza cerca de 2.700 t de resíduos para cada 1.000 toneladas de grãos processados, ou seja, 73% de resíduos (MATOS, 2005). Segundo IPEA (2012) o volume estimado de resíduos gerados na produção brasileira de soja é em torno de 41 milhões de toneladas por ano, provenientes dos restos culturais (hastes, vagem e palha). A produção anual é de 161 milhões de toneladas de resíduos, provenientes de hastes, vagem e palha conforme a produção de 2019 (ABIB, 2011). Para cada hectare de soja produzido são gerados cerca de 3,0 a 4,0 toneladas de resíduos da biomassa vegetal (NOGUEIRA et al., 2000).

A geração de resíduo de soja para o Brasil foi equivalente a 161 milhões de toneladas de resíduos e palhas. A região com maior geração de resíduo foi o centro oeste, apresentando valor de 72,8 milhões de toneladas, seguida da região sul com 51,8 milhões de toneladas. Em relação aos estados, o Mato Grosso apresentou a maior geração, com valor de 44,8 milhões de toneladas, seguido do Rio Grande do Sul 26,6 milhões de toneladas (CONAB, 2019; ABIB, 2011).

#### **4.1.3. Resíduo de Algodoeiro**

O algodoeiro herbáceo (*Gossypium hirsutum* L.) é uma das principais culturas exploradas no Brasil, principalmente para a produção de fibra, que é a principal matéria-prima da indústria têxtil brasileira e mundial, com produção de 2,7 milhões de toneladas de pluma e área plantada correspondente de 1,6 milhão de hectare (CONAB, 2019) gerando, no processamento, 6,6 milhões de toneladas de resíduos por ano, provenientes de rama (hastes e capulho) (ABIB, 2011).

A geração de resíduo de algodoeiro para o Brasil foi equivalente a 6,6 milhões de toneladas de resíduos provenientes de rama (hastes e capulho). A região com maior geração de resíduo foi o centro oeste, apresentando valor de 4,6 milhões de toneladas, seguida da região nordeste com 1,6 milhão de toneladas. Em relação aos estados, o Mato Grosso apresentou a maior geração, com valor de 4,4 milhões de toneladas, seguido de Goiás 166 mil toneladas (CONAB, 2019; ABIB, 2011).

#### **4.1.4. Resíduo de Girassol**

O girassol (*Helianthus annuus* L.) é uma oleaginosa, dicotiledônea anual, que apresenta tolerância ao estresse hídrico (SANTOS, 2014), com área plantada de 65,8 milhões de hectares e produção 116 milhões de toneladas (CONAB, 2019) cujos restos culturais são usados para silagem (AMABLE et al., 2002). Pode produzir cerca de 3,0 a 5,0 toneladas por hectare de restos culturais oriundos de hastes e folhas (GAZZOLA et al., 2012).

A geração de resíduo de girassol para o Brasil foi equivalente a 329 milhões de toneladas de resíduos oriundos de hastes e folhas. A região com maior geração de resíduo foi o centro oeste, apresentando valor de 297 milhões de toneladas, seguida da região sudeste com 40 milhões de toneladas. Em relação aos estados, o Mato Grosso apresentou a maior geração, com valor de 190 milhões de toneladas, seguido de Goiás 103 milhões de toneladas (CONAB, 2019; ABIB, 2011).

#### **4.1.5. Maravalha de Pinus**

O gênero *Pinus* pertence à ordem Coniferae, do grupo das Gymnospermae, não é encontrado na América do Sul em ocorrência natural e, portanto, é uma espécie exótica no Brasil, a qual a madeira apresenta diversas utilidades, como nas indústrias de madeira, de serrados e laminados, de chapas, de resina e de celulose e papel (AGUIAR et al., 2011). No Brasil a área plantada é de 1,7 milhão de hectare e produção 25,84 milhões m<sup>3</sup>/ano (IBÁ, 2021) gerando, no processamento, 5,17 milhões de toneladas de resíduos de maravalha, que corresponde 20% do volume total da matéria prima (HÜEBLIN, 2001). A produção de madeira de *Pinus* está concentrada nos estados do Paraná (43% dos plantios) e em Santa Catarina (24% dos plantios), com geração de 2,2 e 1,24 milhões de m<sup>3</sup>/ano de resíduos, respectivamente.

## **4.2. Peletização**

Nos Estados Unidos após a grande depressão de 1929, o engenheiro Robert T. Bowling, da companhia madeireira Potlatch Forest Industries, desenvolveu, na usina de Weyerhaeuser's Clearwater, um combustível barato em relação a outras fontes, feito a partir

da prensagem das serragens, de aparas e de cavacos, o *pellet*, sendo esse capaz de substituir o carvão mineral (COYNER, 2004).

Na Europa, a primeira indústria de pellets surgiu na cidade de Mora na Suécia com produção iniciada em novembro de 1982. Devido ao alto custo de produção (maior do que o calculado inicialmente) ocorreram problemas financeiros. Pela falta de experiência na produção, no tipo de equipamento a ser utilizado para queima destes. A baixa qualidade dos mesmos fabricados na época e a ineficiência dos equipamentos de combustão levaram ao fechamento da primeira planta industrial em 1986. Em 1987 foi criada uma nova indústria de pellets na cidade de Kil com produção de 3 mil toneladas por ano. A produção de *pellets* de madeira na Europa e na América do Norte foi iniciada depois da crise do petróleo na década de 70 (GARCIA, 2008).

A peletização é um processo de densificação no qual a biomassa é submetida a alta pressão contra uma matriz perfurada, por onde são produzidos os *pellets* de diâmetros finais variando de 6 mm à 12 mm e comprimento variável (STAHL; BERGHEL, 2011), com baixo teor de umidade, alto conteúdo energético e forma e tamanho homogêneos que facilitam a logística no transporte e armazenamento.

Dentre outros fatores, as melhorias das propriedades energéticas da biomassa estimularam a rápida expansão da indústria de *pellets* de madeira em todo o mundo, tornando-o uma commodity negociada internacionalmente com expectativa positiva de maior expansão do mercado (SPELTER; TOTH, 2009; BEEKES, 2014).

Os *pellets* devem ser submetidos a avaliações e classificações físico-químicas e energéticas, para que possam ser utilizados na geração de energia, as quais são baseadas em normas internacionais. O Brasil não possui norma que regule a qualidade dos *pellets*, dessa forma o mercado Europeu se destaca na normatização de pellets com a finalidade de garantir a uniformidade do produto e o benefício de seus consumidores (RANGEL et al., 2018).

As normas foram elaboradas e implementadas isoladamente em países como Áustria, Alemanha e Suécia, com diferenças significativas em diversos parâmetros de qualidade, dificultando o atendimento dos requisitos por países exportadores que visavam ao mercado europeu. Para resolver estas diferenças o Comitê Europeu de Normalização (CEN) promoveu um movimento para uniformização das normas em todo o continente (DIAS et al., 2012), criando uma marca de certificadora internacional: ENplus.

A ENplus estabelece rigorosos limites em toda cadeia de fornecimento e produção de pellets, desde o processo de peletização até a entrega final ao cliente através da empresa Deutsches Pelletinstitut (DEPI). Os requisitos de qualidade para produção de *pellets* de madeira da ENplus se baseiam na ISO 17225 – 2, e para *pellets* não lenhosos (Tabela 1) baseiam na ISO 17225 – 6 que são padrões internacionais, sendo que a ISO 17225-6 inclui duas tabelas de classificação: 1. *Pellets* das classes A e B, produzidos a partir de biomassa herbácea e de frutos, misturas (blends) e misturas e 2. *Pellets* de palha, miscanthus e *pellets* de capim-cana. E dessa forma além de certificação, para determinação de padrões de qualidade, criaram-se a DIN EN ISO 17225 – 2 que estabelece uma série de normas internacionais a serem utilizadas no controle de qualidade de toda biomassa compactada que recebe certificação DIN Plus e/ou ENplus (RANGEL et al., 2018).

Tabela 1. Especificações de qualidade exigidos para *pellets* oriundos de biomassa não lenhosas, segundo a norma ISO 17225-6, para aplicações industriais e domésticas. (ISO 17225-6, 2014).

Propriedades	Unidade	Pellets não lenhosos	Pellets não lenhosos
		ISO 17225- 6 Classe A	ISO 17225- 6 Classe B
Diâmetro	Mm	6,0 - 10,0	6,0 - 10,0
Comprimento	Mm	3,15-40,0	3,15-40,0
Densidade a granel	kg m <sup>-3</sup>	≥600,0	≥600,0
Teor de umidade (base seca)	%	≤12,0	≤15,0
Teor de cinzas	%	≤6,00	≤10,00
Poder cal. (PCI)	MJ kg <sup>-1</sup>	≥14,1	≥14,1
Nitrogênio	%	≤1,50	≤2,00
Enxofre	%	≤ 0,20	≤ 0,30
Cloro	%	≤ 0,20	≤ 0,30
Cádmio	mg kg <sup>-1</sup>	≤ 0,50	≤ 0,50
Crômio	mg kg <sup>-1</sup>	≤ 50,0	≤ 50,0
Cobre	mg kg <sup>-1</sup>	≤ 20,0	≤ 20,0

Mercúrio	mg kg <sup>-1</sup>	≤ 0,10	≤ 0,10
Chumbo	mg kg <sup>-1</sup>	≤ 10,0	≤ 10,0
Zinco	mg kg <sup>-1</sup>	≤ 100,0	≤ 100,0
Durabilidade mecânica	%	≥ 97,5	≥ 96,0
Finos	%	≤ 2	≤ 3

### 4.3. Torrefação

A torrefação é um tratamento térmico a temperaturas relativamente baixas, até 300°C, com finalidade de produzir um combustível com maior densidade energética (CHEN et al., 2015). Caracterizado pela ausência parcial ou completa de agentes oxidantes (ar), sendo uma fase inicial da pirólise que visa a produção de um combustível sólido.

Os tratamentos térmicos podem ser classificados como leves, médios e severos de torrefação, cujas temperaturas são de aproximadamente 200–235, 235–275 e 275–300 °C, respectivamente (CHEN; KUO, 2011).

As características do material torreficado variam em função de vários fatores relacionados ao processo como atmosfera, temperatura final do processo, tempo de permanência, taxa de aquecimento e propriedades iniciais da biomassa (PĂRĂRIȚĂ et al., 2014; ALMEIDA et al., 2010; ESTEVES; PEREIRA, 2009), e tipo de biomassa (ALAKANGAS et al., 2012).

As principais alterações do material torreficado são o aumento da estabilidade dimensional, diminuição da higroscopicidade, aumento do poder calorífico e densidade energética, melhor capacidade de moagem e uniformidade das propriedades da biomassa e resistência à degradação biológica (CHEN et al., 2015).

Dividida em duas classes (BACH; SKREIBERG, 2016), a torrefação seca ocorre em atmosfera inerte com baixa disponibilidade de oxigênio permitindo uma degradação parcial sem combustão (VAN DER STELT et al., 2011) e na torrefação úmida, a degradação parcial ocorre através de aquecimento controlado em água quente ou vapor (ACHARYA et al., 2015; SERMYAGINA et al., 2015).

A torrefação em escala comercial ainda está em um estágio inicial de desenvolvimento apenas para os processos secos, não existe uma cadeia de produção consolidada de biomassa torreficada no mundo (WILÉN et al., 2014; KOPPEJAN et al., 2012). A produção atual é

restrita a instalações piloto, de demonstração e de pequena escala nos países como Estados Unidos, Canadá e Europa. Em que os principais projetos estão operando oficialmente em escala comercial, com produções superiores a 2 t / h nas cidades de Derby (Reino Unido), Quitman (EUA), Duiven (Holanda), County Roscommon (Irlanda) e Dilsen - Stokkem (Bélgica) (WILD et al., 2016)

No Brasil não há instalações consolidadas para torrefação de biomassa operando em escala comercial. Os projetos existentes estão em universidades e centros de pesquisa, associados ou não a empresas do setor privado, no desenvolvimento de reatores para aplicação de tratamento térmico. Foi desenvolvido um protótipo metálico de um reator de parafuso semicontínuo, com reutilização de gases voláteis no sistema de aquecimento, pela Universidade Federal de Viçosa (Universidade Federal de Viçosa - UFV), em que a patente foi submetida ao INPI (Instituto Nacional de Propriedade Intelectual - Brasil) (DA SILVA et al., 2018).

## **5. MATERIAL E MÉTODOS**

### **5.1. Coleta e preparo dos resíduos agroflorestais**

Foram coletados resíduos agrícolas provenientes da colheita de Feijão, Soja e Girassol oriundos dos restos culturais (caule lenhoso e hastes lenhosas) em área experimental da Universidade Federal de Goiás-UFG na cidade de Goiânia, resíduo de Algodoeiro oriundos dos restos culturais (caule lenhoso e hastes lenhosas) em área de cultivo de empresa de plantação de algodão em Palmeiras de Goiás no estado de Goiás e maravalha de Pinus coletada em empresa de painéis na cidade de Brasília no estado do Distrito Federal (Figura 1). Após a coleta os resíduos de feijoeiro, soja, girassol e algodoeiro foram selecionados e classificados retirando as folhas e as raízes e mantendo os resíduos lenhosos (caule lenhosos e hastes lenhosas) os quais foram utilizados neste trabalho. Após a seleção e classificação estes foram secos em estufa por 24 horas para diminuição da umidade e assim redução dos riscos de degradação por patógenos e para que estes fossem submetidos ao processo de trituração e moagem sem comprometimento dos equipamentos. A moagem foi realizada em um moinho de facas de laboratório com malha de 0,250 mm (60 mesh). Após seleção, secagem, trituração e moagem, estes resíduos foram colocados em bancada de laboratório para obtenção do equilíbrio higroscópico (Figura 2). A partir desses resíduos coletados e preparados foram

determinados os tratamentos conforme demonstrado na Figura 3, contendo resíduo de Algodoeiro (100%), resíduo de Girassol (100%), Mistura contendo 50% de resíduo de maravalha de Pinus + 50% de resíduo de Girassol), resíduo de Feijoeiro (100%) e resíduo de Soja (100%).



Figura 1. Resíduos agroflorestais após coleta em campo. A) de Feijoeiro B) de Algodoeiro C) de Soja D) de girassol e E) maravalha de pinus.



Figura 2. Preparo do resíduo do algodão: A) plantio. B) coleta. C) secagem. D) resíduo seco em estufa por 24 horas. E) resíduo triturado. F) resíduo moído com umidade de equilíbrio higroscópico.

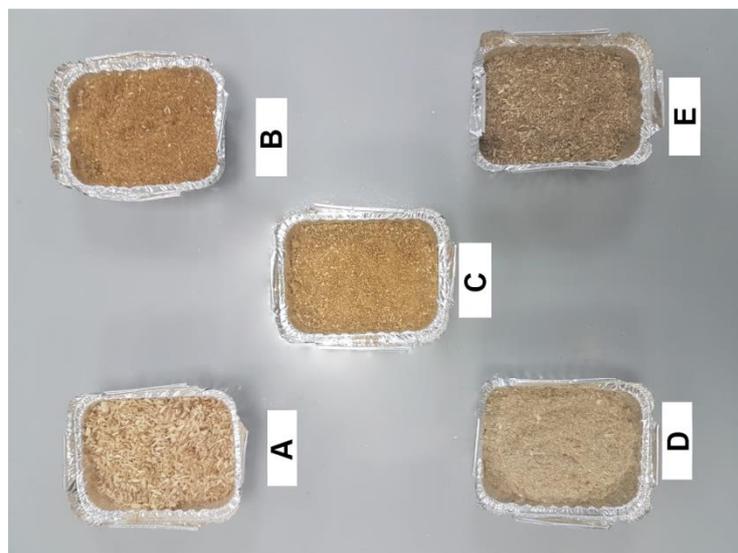


Figura 3. Resíduos agroflorestais moídos e na umidade de equilíbrio higroscópico. A) de Algodoeiro (100%), B) de Girassol (100%), C) Mistura (50% de maravalha de Pinus + 50% de Girassol), D) de Feijoeiro (100%) e E) de Soja (100%).

## 5.2. Caracterização dos resíduos agroflorestais após o equilíbrio higroscópico.

### 5.2.1. Determinação do teor de umidade.

O teor de umidade foi determinado segundo a norma ISO 18134-1 (2015) em que as amostras foram secas em estufa de circulação de ar aquecida a  $105 \pm 2^\circ\text{C}$ , até atingirem uma massa constante. Equação 1.

Equação 1.

$$TU: \frac{M_{inicial} - M_{final}}{M_{inicial}} * 100$$

Em que:

TU: Teor de umidade (%);

M inicial: Massa inicial da biomassa (úmida) (g);

M final: Massa final da biomassa (seca) (g);

### 5.2.2. Determinação da Classificação Granulométrica e da densidade do granel.

A classificação granulométrica foi determinada conforme a norma NBR – NM 248 (2003), e que utilizou-se um agitador orbital de peneiras com batidas intermitentes (Figura 4) com um conjunto de peneiras com diâmetros de abertura de 20, 40, 60, 100 Mesh e fundo. Amostra de 40 gramas, de cada resíduo, foi colocada na peneira superior (20 Mesh), tampada e o conjunto de peneiras foi agitado por 10 minutos e ao final, com auxílio de um pincel foram retiradas as frações retidas em cada peneira e pesadas em uma balança semi-analítica com resolução de 0,001g. O ensaio foi realizado no Laboratório de Qualidade da madeira e bioenergia da Universidade Federal de Goiás.



Figura 4. Classificação Granulométrica. A) Agitador eletro-magnético de peneiras.

A densidade do granel foi determinada conforme a norma ISO 17828 (2015) com adaptação quanto ao recipiente: proveta de 50 ml. Determinada pela razão entre a massa do resíduo e o volume de um recipiente, foram realizadas cinco repetições. Equação 2.

Equação 2.

$$Dg: \frac{Massa}{Vr} * 100$$

Em que:

Dg: Densidade a granel ( $\text{kg.m}^{-3}$ );

Massa: Massa da amostra (kg);

Vr: Volume do recipiente utilizado ( $\text{m}^3$ );

### 5.2.3. Determinação da Análise Imediata dos resíduos agroflorestais

Foi determinada a análise imediata dos resíduos agroflorestais, onde se determina o teor de material volátil, o teor de cinzas e, por diferença, o teor de carbono fixo, foi realizada com base nas normas ISO 18122 (2015) e ISO 18123 (2015). O Teor de materiais voláteis foi determinado a partir de amostra de 1,0 g de material moído, seco a 0%, com granulometria < 60 mesh, em cadinho de porcelana, colocado no interior de forno mufla à temperatura de  $900 \pm 10^\circ\text{C}$  por 7 minutos, com porta fechada (Figura 5).



Figura 5. Sequência para obtenção de dados para a determinação do teor de materiais voláteis: A) amostras no interior da mufla. B) amostras no dessecador.

A precisão deste ensaio entre duplicatas é de 1 %, calculado por meio da equação 3.  
Equação 3.

$$MV: \frac{M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}}}{M_{\text{amostra}}} * 100$$

Em que:

MV: Teor de materiais voláteis (%);

M inicial: Massa inicial do cadinho + amostra (g);

M final: Massa final do cadinho + amostra (g);

M amostra: Massa inicial da amostra seca (g)

O teor de cinzas foi obtido com amostra de 1,0 g de material moído, seco a 0%, com granulometria < 60 mesh colocado em cadinho de porcelana. O conjunto do cadinho com a amostra é colocado em forno mufla ajustado para 250°C, ao atingir este patamar em um período de 30 a 50 minutos deve permanecer por 60 minutos. Novo ajuste é feito para 550 ± 10°C e, ao atingir este patamar em 30 minutos, permanecer por 120 minutos (Figura 6).



Figura 6. Sequência para obtenção de dados para a determinação do teor de cinzas: A) amostras inseridas na Mufla. B) amostras em dessecador após ensaio. C) cinzas de biomassa de Girassol.

A precisão deste ensaio é 0,1% para teor de cinzas < 1% e 10% para teor > 1% e o cálculo é feito por meio da Equação 4.

Equação 4.

$$CZ: \frac{M_{final} - M_{cadinho}}{M_{amostra}} * 100$$

Em que:

CZ: Teor de cinzas, em (%);

M final: Massa final do cadinho + amostra (g);

M cadinho: Massa do cadinho (g);

M amostra: Massa inicial da amostra seca (g)

O Teor de carbono fixo é uma medida indireta e calculada conforme Equação 5.

Equação 5.

$$CF = 100 - (MV + CZ)$$

Em que:

CF: Teor de carbono fixo (%);

MV: Teor de materiais voláteis (%);

CZ: Teor de cinzas, em (%);

#### **2.2.4. Determinação da análise elementar dos resíduos agroflorestais**

A análise elementar de carbono, hidrogênio e nitrogênio foi determinada a partir de aproximadamente 3,0 gramas de material moído (60 mesh), seco a 0%. Foi obtida por meio de um analisador elementar CHNS da marca Perkin Elmer modelo EA 2400 series II (Figura 7), o qual possui dois modos de análise: CHN e CHNS, o sistema conta com um forno de alta temperatura para completa combustão das amostras, retenção seletiva dos gases (separação por cromatografia frontal) e detecção dos gases por TCD (detector de condutividade térmica). O teor de oxigênio foi obtido pela diferença, utilizando as porcentagens de carbono, hidrogênio, nitrogênio e subtraindo 100%. Foi realizado no Laboratório Multiusuários II do Instituto de Química da Universidade de Brasília.



Figura 7. Analisador elementar CHNS Perkin Elmer modelo EA 2400. Fonte: [www.caiq.unb.br](http://www.caiq.unb.br)

#### **5.2.5. Determinação do Poder Calorífico dos resíduos agroflorestais**

O poder calorífico superior (PCS) foi determinado por meio de uma bomba calorimétrica Ika 2000, com base na norma ISO 18125 (2017), a partir de aproximadamente 1 grama de material moído, seco a 0%, com granulometria < 60 mesh, prensado em uma prensa

manual formando um pequeno pellet. O valor médio do poder calorífico considerado foi aquele entre dois valores cuja diferença não ultrapassou 29 kcal/kg (Figura 8).



Figura 8. Determinação do poder calorífico. A) Bomba calorimétrica.

O poder calorífico inferior (PCI) a 0% de umidade foi obtido a partir do poder calorífico superior, utilizando teores de hidrogênio de cada resíduo calculado através do ensaio de análise elementar (Van Loo & Koppejan (2008)), pela equação 6.

Equação 6.

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

O poder calorífico útil (PCU), na umidade de equilíbrio higroscópico de cada tratamento (resíduo), foi obtido a partir do poder calorífico inferior (PCI), pela Equação 7.

Equação 7.

$$PCU = PCI * (1 - U) - 600 * U$$

Em que:

PCS: Poder calorífico superior ( $\text{MJ.kg}^{-1}$ );

PCI: Poder calorífico inferior ( $\text{MJ.kg}^{-1}$ );

PCU: Poder calorífico útil ( $\text{MJ.kg}^{-1}$ );

H: Hidrogênio (%);

U: Umidade em base úmida (%).

### 5.2.6. Determinação da densidade energética dos resíduos agroflorestais

A densidade energética (DEg) foi calculada a partir do produto entre o valor do poder calorífico útil e a densidade do granel dos resíduos agroflorestais na umidade de equilíbrio higroscópico, conforme Equação 8.

Equação 8.

$$DEg = PCU * DG$$

Em que:

DEg = Densidade energética (GJ.m<sup>-3</sup>);

PCU = Poder calorífico útil (MJ.kg<sup>-1</sup> na umidade “u”);

DG = Densidade granel (kg.m<sup>-3</sup> na umidade “u”)

### 5.2.7. Determinação da análise química dos resíduos agrícolas (Algodoeiro, feijoeiro, girassol e soja)

Os ensaios para determinar o teor de extrativos, lignina e cinzas livres de extrativos foram realizados no Laboratório de Química do Laboratório de Produtos Florestais - LPF/SFB- Brasília- DF. Estes ensaios foram realizados para os resíduos de Algodoeiro, feijoeiro, girassol e soja, não sendo realizado para o tratamento de mistura.

O teor de extrativos foi determinado seguindo a norma TAPPI 204 om-88 (TAPPI, 1996), com adaptações do próprio laboratório. O qual consiste em preparar 5 gramas de amostra em cartucho de celulose tampados com algodão, acoplados na coluna de extração Soxhlet. É utilizado mistura de Etanol:Tolueno, na proporção 1:2, a qual é colocada em balões de fundo chato e utilizada como solvente. O extrator condensa o solvente acumulando os extrativos no fundo dos balões, após a retirada dos extrativos esses são levados para estufa por 2 horas a 115°C e em seguida pesados (Figura 9).



Figura 9. Retirada dos extrativos dos resíduos. A) extrator. B) processo de extração. C) balões com extrativos (girassol, algodão, soja e feijão) após secagem.

O teor de extrativos foi determinado a partir da Equação 9.

Equação 9.

$$Te = \frac{m2 - m1}{m} * 100$$

Em que:

Te = Teor de extrativos (%);

m1= Massa do balão de extração seco antes da extração (g);

m2 = Massa do balão de extração após extração (g);

m = Massa da amostra descontada a umidade (g).

O teor de cinzas sem extrativos foi determinado baseado na norma TAPPI T211/; om-93 (TAPPI, 1993). Para realização do ensaio utilizou-se 2 gramas de amostra, em cadinhos previamente calcinados, colocados em mufla a temperatura subindo gradativamente até 525°C, permanecendo por 4 horas (Figura 10).



Figura 10. Teor de cinzas: A) de algodão e soja. B) de girassol e feijão. C) resíduos livres de extrativos.

O teor de cinzas sem extrativos foi calculado através da Equação 10.

Equação 10.

$$Cz = \frac{m1 - m0}{m} * 100$$

Em que:

Cz = Teor de cinzas sem extrativos (%);

m= Massa da amostra (g) a 0% de umidade;

m0 = Massa do cadinho (g);

m1 = Massa do cadinho + amostra calcinada a 525°C (g).

O Teor de lignina ácida insolúvel e solúvel foi determinado adotando os procedimentos Laboratory Analytical Procedure #003 e #004, respectivamente (TEMPLETON; EHRMAN, 1995). Adicionando-se 3 ml de ácido H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> à 72% em frasco de reação na presença de 0,3000 gramas de amostra, colocados em banho maria a 30°C e misturados a cada 6 minutos por 1 hora.

Posteriormente, foram medidos 84 ml de água deionizada e acrescentados aos frascos de reação que foram tampados e autoclavados a 121°C por 1 hora. O conteúdo de cada frasco foi, então, filtrado a vácuo em cadinhos filtrantes, onde a parcela líquida de cada um foi

transferida para kitassatos distintos para determinação dos teores de lignina ácida solúvel em espectrofotômetro UV/VIS. A parcela sólida retida no filtro foi levada para estufa por 3 horas a 105°C para obtenção da lignina insolúvel (Figura 11).

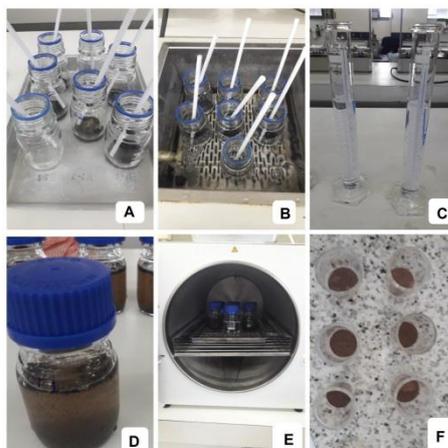


Figura 11. Processo de isolamento da lignina ácida solúvel e insolúvel: A) frasco de reação com as amostras e o ácido. B) frasco de reação em banho maria. C) proveta com 84 ml de água deionizada. D) frasco de reação com amostra, ácido e água. E) frasco de reação em autoclave. F) cadinhos filtrantes com parcela sólida.

O teor de lignina insolúvel foi determinado através da Equação 11.

Equação 11.

$$Liins = \frac{m2 - m1}{m}$$

Em que:

Liins= Teor de lignina insolúvel (%)

m = Massa da amostra descontada a umidade (g),

m1 = Massa do cadinho filtrante (g)

m2 = Massa do cadinho filtrante + lignina insolúvel descontada as cinzas livres de extrativos (g) proporcionais à amostra e à massa de lignina obtida.

A lignina solúvel foi analisada por meio de um espectrofotômetro 700 plus, da marca FEMTO, onde são obtidos o valor de absorbância (medida a 205 nm) e o fator de diluição, tendo ácido sulfúrico a 4% como branco (Figura 12).

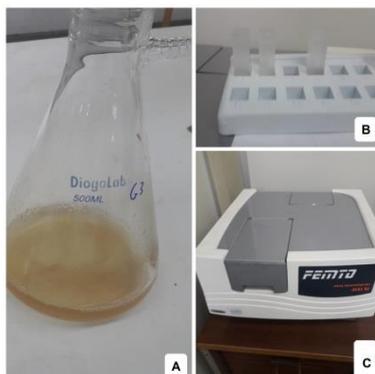


Figura 12. Análise da Lignina solúvel: A) parcela líquida da amostra de lignina em kitassato. B) amostra com diluição adequada em cubeta. C) espectrofotômetro utilizado.

O cálculo do teor de lignina solúvel foi determinado através da Equação 12. O teor de lignina total é o somatório da lignina insolúvel e da solúvel.

Equação 12.

$$Lisol = \frac{A}{110} * F * \frac{87}{1000} * 100$$

Em que:

Lisol= Teor de lignina solúvel (%);

m = Massa da amostra (g) descontada a umidade;

A = Média da absorbância lida pelo espectrofotômetro (nm);

F = Fator de diluição.

O teor de holocelulose livre de extrativos foi calculado por diferença, onde se subtrai de 100%, os teores percentuais de lignina total e cinzas livres de extrativos, conforme a Equação 13.

Equação 13.

$$TH = 100\% - Litot - Cz$$

Em que:

TH = Teor de holocelulose (%);

Litot = Teor de lignina total (%);

Cz = Teor de cinzas livre de extrativos (%).

### 5.3. Fabricação dos *pellets* de resíduos agroflorestais

Foram produzidos os *pellets* a partir de 8 kg de cada tipo de resíduo agroflorestais de feijoeiro (100%), soja (100%), girassol (100%), algodoeiro (100%) e de mistura (50% de resíduo de girassol moído com 50% de maravalha de pinus) moídos em malha de 0,250 mm (60 mesh) e na umidade de equilíbrio higroscópico (variando entre 11% e 15%) obtida em condicionamento em laboratório. Em que a compactação do material foi realizada em uma peletizadora de laboratório da marca Eng-Maq, modelo 0200V, com potência de 7,5 a 10 CV, com capacidade de alimentação de 110 kg/h, constituída de uma matriz com forma circular com orifícios de 6 mm de diâmetro e comprimento padronizado de 30 mm (Figura 13).



Figura 13. Processo de produção dos pellets: A) matriz com forma circular com orifícios de 6 mm de diâmetro. B) comando de alimentação. C) formação dos pellets. D) pellets em resfriamento.

### 5.4. Torrefação dos *pellets* de resíduos agroflorestais

Após a produção dos *pellets* de resíduos agroflorestais, estes foram submetidos aos ensaios de torrefação, sendo estes realizados no Laboratório de Energia de Biomassa do Laboratório de produtos Florestais - LPF/SFB, em um reator (Figura 14) que possibilita criações de diferentes rampas e patamares de aquecimento, os ensaios foram realizados com taxa de aquecimento de 5°C por mim, temperatura final de 250°C e tempo na temperatura final de 30 minutos (Figura 15). Foram realizadas três repetições para cada tratamento (*Pellet* de feijoeiro, soja, girassol, algodoeiro e mistura (50% de resíduo de girassol e 50% de resíduo de maravalha de pinus), cada repetição foi realizada utilizando 200 *pellets*.

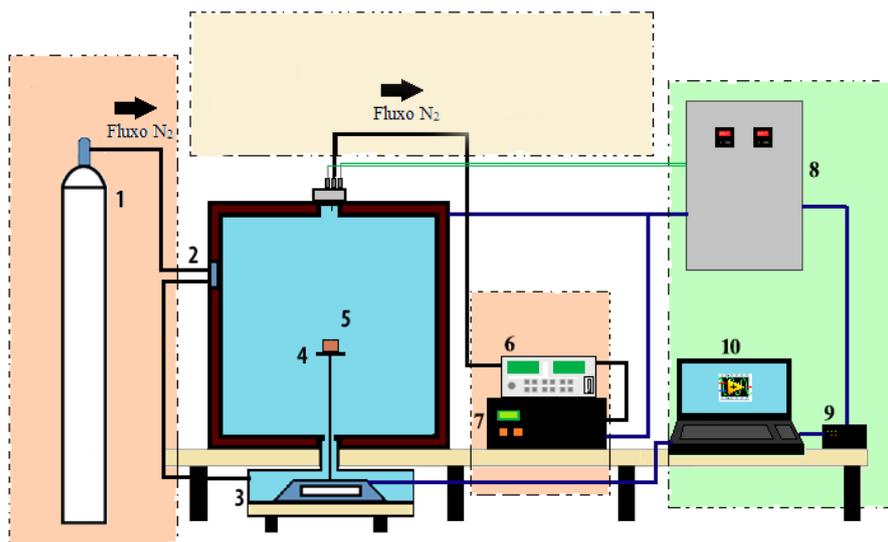


Figura 14. Esquema do reator de torrefação: 1) cilindro de nitrogênio; 2) válvula solenoide de controle do fluxo N<sub>2</sub>; 3) Balança; 4) Amostra; 5) Reator de Torrefação (Estufa adaptada); 6) Bomba de fluxo; 7) Controlador do nível de N<sub>2</sub>; 8) Quadro de comando; 9) Gantner (comunicação com o CPU); 10) Computador (Labview). Fonte: Edgar Amaral Silveira, Doutor em Ciências Mecânicas – Unb.



Figura 15. Produção dos pellets torrados: A) determinação dos patamares de torrefação. B) pellets no interior do reator. C) pellets torrados de soja.

### 5.5. Caracterização dos *pellets* não torrados e torrados

Após a produção dos *pellets* não torrados e a produção dos *pellets* torrados, estes foram submetidos ao processo de determinação das dimensões (diâmetro e comprimento) através de paquímetro digital, umidade e densidade aparente, foram selecionados aleatoriamente cinquenta pellets de cada tipo de resíduo, após a produção e resfriamento dos *pellets* não torrados e torrados. O teor de umidade foi determinado para cada *pellet* (U%), utilizando-se estufa de circulação de ar aquecida a  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  para a secagem dos *pellets* a 0% de umidade, por um período de 24 horas e balança analítica com resolução de 0,001g (ASABE, 2007).

A densidade aparente unitária dos *pellets* não torrados e torrados a umidade equilíbrio ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) foi obtida, por meio de método estequiométrico, com o volume calculado considerando-se a forma cilíndrica dos pellets e a massa obtida através de balança analítica com resolução de 0,001 g.

A densidade a granel dos *pellets* não torrados e torrados a umidade equilíbrio ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) foi calculada, com base na norma ISO 18847 (2016) pela razão entre a massa dos *pellets* colocados em um recipiente: proveta de 100 ml de volume conhecido. Foram realizadas cinco repetições por tratamento.

A taxa de compactação (TC) foi obtida dividindo a densidade a granel dos *pellets* (DG *pellets* não torrados) pela dos resíduos *in natura* (DG resíduo) através da Equação 14.

Equação 14.

$$TC = \frac{DG \text{ pellets}}{DG \text{ resíduo}}$$

Em que:

TC = Taxa de compactação

DG *pellets* = Densidade a granel dos *pellets* não torrados.

DG resíduo = Densidade a granel dos resíduos agroflorestais.

A durabilidade dos *pellets* não torrados e torrados foi determinada através do ensaio de resistência ao impacto e abrasão conforme Toscano et al. (2013) e Liu et al. (2014). Realizada em uma peneira vibratória com tela de tamanho de 2,83 mm, permanecendo por 10 minutos, a 80 rotações por minutos, a partir da massa inicial e final. Foram utilizados vinte *pellets* para cada tratamento (Figura 16).



Figura 16. Caracterização dos pellets: A) determinação da durabilidade. B) determinação da densidade aparente.

A durabilidade foi calculada pela Equação 15 e o teor de finos das amostras foi determinado pela Equação 16.

Equação 15

$$Du (\%) = 100 - \frac{mi - mf}{mi} * 100\%$$

Em que: Du(%) é o percentual de durabilidade (%), mi é a massa inicial (g) e mf é a massa após o tamboramento (g).

Equação 16

$$F (\%) = 100 - Du (\%)$$

Em que: F(%) é o percentual de finos (%).

Conforme realizado para os resíduos agroflorestais, foi determinado o poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI), poder calorífico útil (PCU), análise imediata (Teor de carbono fixo, cinzas e material volátil) e análise elementar (Teor de hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, carbono) para os *pellets* não torrados e torrados.

A densidade energética a granel (DEg) dos *pellets* não torrados e torrados foi calculada multiplicando-se o poder calorífico útil dos *pellets* pela densidade a granel dos *pellets*, na mesma umidade de equilíbrio higroscópico. E a densidade energética sólida (DEs), através do produto entre a densidade aparente e o poder calorífico útil dos *pellets*. Calculada pela Equação 17

Equação 17

$$DEg = DG \times PCU$$

$$DEs = DA \times PCU$$

Em que:

DEg = Densidade energética a granel (GJ.m<sup>-3</sup>);

DEs = Densidade energética sólida (GJ.m<sup>-3</sup>);

PCU = Poder calorífico útil (MJ.kg<sup>-1</sup> na umidade “u”);

DG = Densidade granel (kg.m<sup>-3</sup> na umidade “u”)

DA = Densidade aparente (kg.m<sup>-3</sup> na umidade “u”)

## 5.6. Classificação dos *pellets* não torrados

Os *pellets* não torrados foram classificados a partir da norma ISO 17225-6 (2014) para *pellets* não lenhosos.

## 5.7. Determinação dos rendimentos gravimétrico e energéticos dos *pellets* torrados

Foram calculados os rendimentos gravimétricos dos *pellets* torrados pela razão entre a massa torrificada e a massa antes da torrefação através da Equação 18.

Equação 18.

$$\mathbf{RG: \frac{M_{\text{torr}}}{M_{\text{n\~{a}o\ torrado}} * 100}}$$

Em que:

RG = Rendimento Gravimétrico em %

M torr = Massa dos *pellets* torrados (kg)

M não torrado = Massa dos *pellets* não torrados (kg)

O rendimento energético dos *pellets* torrados foi calculado através da Equação 19, a partir dos valores de massas dos *pellets* e poderes caloríficos destes antes e após a torrefação.

Equação 19.

$$\mathbf{RE: \frac{M_{\text{torr}} * \text{PCS torr}}{M_{\text{n\~{a}o\ torrado}} * \text{PCS n\~{a}o\ torrado}} * 100}$$

Em que:

RE = Rendimento Energético em %

M torr = Massa dos *pellets* torrados (kg)

M não torrado = Massa dos *pellets* não torrados (kg)

PCS torr = Poder calorífico superior dos *pellets* torrados (MJ.kg<sup>-1</sup>)

PCS não torrado = Poder calorífico superior dos *pellets* não torrados (MJ.kg<sup>-1</sup>)

### **5.8. Análises estatísticas dos tratamentos (Resíduos *in natura*, *pellets* não torrados e *pellets* torrados).**

Foram realizadas estatísticas descritivas para as caracterizações físicas, químicas e energéticas dos resíduos agrícolas, *pellets* não torrados e *pellets* torrados. Para as propriedades avaliadas foi utilizado um delineamento inteiramente casualizado, com cinco tratamentos

(cinco tipos de resíduos agrofloretais) e diferentes números de repetições, sendo cada propriedade obtida por meio de métodos laboratoriais específicos. Os resultados foram expressos como as médias de pelo menos três repetições.

Para os parâmetros avaliados foram verificadas as premissas de homogeneidade de variância e distribuição normal das amostras necessárias para o uso da estatística paramétrica (teste F). Para as variáveis que não apresentaram homogeneidade de variâncias, foi utilizado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis ( $p \leq 0,05$ ). As características dos resíduos agrícolas, *pellets* não torrados e *pellets* torrados foram submetidas à análise de variância (ANOVA) e comparadas pelo teste Tukey, com nível de significância de  $\alpha = 0.05$  e de 95 % probabilidade de acerto.

### **5.9. Determinação dos ganhos e perdas dos resíduos frente aos tratamentos de peletização e torrefação**

A partir dos dados de teores de umidade, densidade a granel, poder calorífico útil e densidade energética dos resíduos, *pellets* não torrados e torrados.

Foram calculados os ganhos e perdas comparando os resíduos moídos em condição de equilíbrio higroscópico frente aos *pellets* não torrados e torrados através das características físicas e energéticas, conforme a equação 20:

Equação 20

$$\text{Ganho ou perda: } \frac{\text{teores } pellets * 100}{\text{teores resíduos}} - 100$$

Em que:

Ganho ou perda em (%) de cada variável;

Teores pellets = teor de cada variável de *pellet* não torrado ou *pellet* torrado (unidade da variável);

Teores resíduos = teor de cada variável de resíduo (unidade da variável).

## **6. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

## 6.1. CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS AGROFLORESTAIS PARA FINS ENERGÉTICOS.

Cinco tipos de resíduos agroflorestais foram analisados: resíduo de algodoeiro (100%), girassol (100%), feijoeiro (100%), soja (100%) e de mistura contendo 50% de resíduo de maravalha de Pinus e 50% de Girassol (Figura 17).

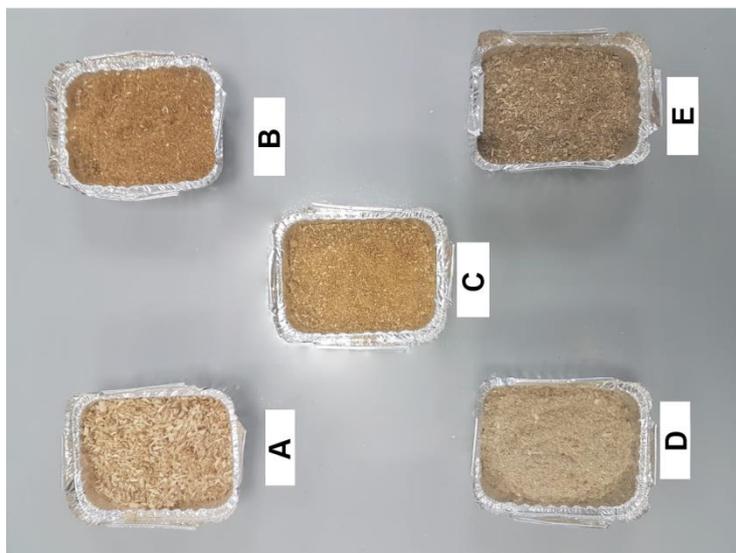


Figura 17. Resíduos agroflorestais moídos e na umidade de equilíbrio higroscópico. A) de Algodoeiro (100%), B) de Girassol (100%), C) Mistura (50% de maravalha de Pinus + 50% de Girassol), D) de Feijoeiro (100%) e E) de Soja (100%).

### 6.1.1. Teor de umidade dos resíduos agroflorestais

O teor de umidade da biomassa é uma das variáveis mais importantes no processo de pelletização, pois pode afetar a resistência e a velocidade de produção dos *pellets*, pois o aumento de umidade pode aumentar a fluidez da biomassa, permitindo passagem suave pelos orifícios, e seu teor ideal varia de acordo com o tipo de matéria-prima utilizada (CHEW et al., 2018), a umidade ajuda na aglutinação e aumenta a ligação pelas forças de van der Waal, reduz a temperatura de transição vítrea e promove a formação de ponte sólida, influenciando a qualidade do *pellet* (TUMULURU et al., 2011).

O teor de umidade (base úmida) dos resíduos moídos e na umidade de equilíbrio higroscópico variou de 10,30 % (mistura: girassol/pinus) a 12,86% (girassol) (Tabela 2). No entanto, os resíduos de feijão, girassol, soja e algodoeiro apresentaram os maiores valores

entre todos os resíduos. Conforme Garcia et al. (2019), a faixa de umidade dos seus resíduos estudados variou entre 5% e 23% dependendo da matéria prima, o que comprova que cada biomassa se comporta de maneira diferente e seu conteúdo de umidade pode variar quando peletizado (GARCIA et al., 2019). Dessa forma, um aumento no teor de umidade melhora a fluidez da amostra, permitindo superar a resistência ao atrito e passar pelos furos da matriz com maior facilidade. Um teor de umidade de biomassa insuficiente pode levar ao bloqueio da matriz, enquanto um teor de umidade excessivamente alto pode criar pellets macios com alta umidade e quebradiços (CHEW et al., 2018).

Tabela 2. Teor de umidade (TU) médio de resíduos agroflorestais estudados.

Características	Resíduos agroflorestais				
	Mistura	Algodoeiro	Soja	Feijoeiro	Girassol
Teor de Umidade (base úmida)	10,30 a	11,82 b	12,04 bc	12,49 bc	12,86 c
(%)	(2,58)	(2,62)	(5,75)	(4,19)	(1,87)

Obs: Médias seguidas da mesma letra, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p > 0,05$ ), entre parênteses são os coeficientes de variação em %. Mistura: girassol/ maravalha de pinus.

### 6.1.2. Classificação granulométrica dos resíduos agroflorestais

O tamanho da partícula tem influência no processo de peletização uma vez que partículas maiores atuam como pontos de ruptura pré-determinados no *pellet* (KALIYAN, 2009) e resultam em maior consumo de energia na prensa devido à moagem adicional entre os rolos e a matriz (KIRSTEN et al., 2016; KALIYAN; MOREY, 2010; BERGSTROM, 2008), por outro lado partículas menores podem causar atolamento e afetar a capacidade de produção (KALIYAN; MOREY, 2009; STELTE et al., 2011b). Assim, o tamanho das partículas deve ser controlado para que não comprometa o consumo de energia e a capacidade de produção e geração de finos e com isto os custos da produção (KIRSTEN et al., 2016; PRADHAN et al., 2018).

No presente estudo houve uma predominância de partículas maiores presentes nas classes de 20 mesh (0,841 mm) a 60 mesh (0,250 mm), (Figura 18), predominantes nos resíduos de algodoeiro, os quais foram moídos em moinho de facas de laboratório com malha de 0,250 mm (60 mesh). Corroborando, Shaw et al. (2019) trabalhando com *pellets* de madeira de álamo e de palha de trigo, observaram que quando o tamanho das partículas diminuiu de 3,2 para 0,8 mm (peneiras de moinho de martelos) ocorreu um aumento na densidade dos *pellets*, diminuição na expansão diamétrica e aumento na resistência à tração. Kaliyan e Morey, (2009) e Stelte et al. (2011b) observaram que mistura de tamanhos de partícula diferentes gera uma qualidade ideal de *pellet*, pois permite a ligação entre partículas com quase nenhum espaço entre elas, e assim melhor coesão.

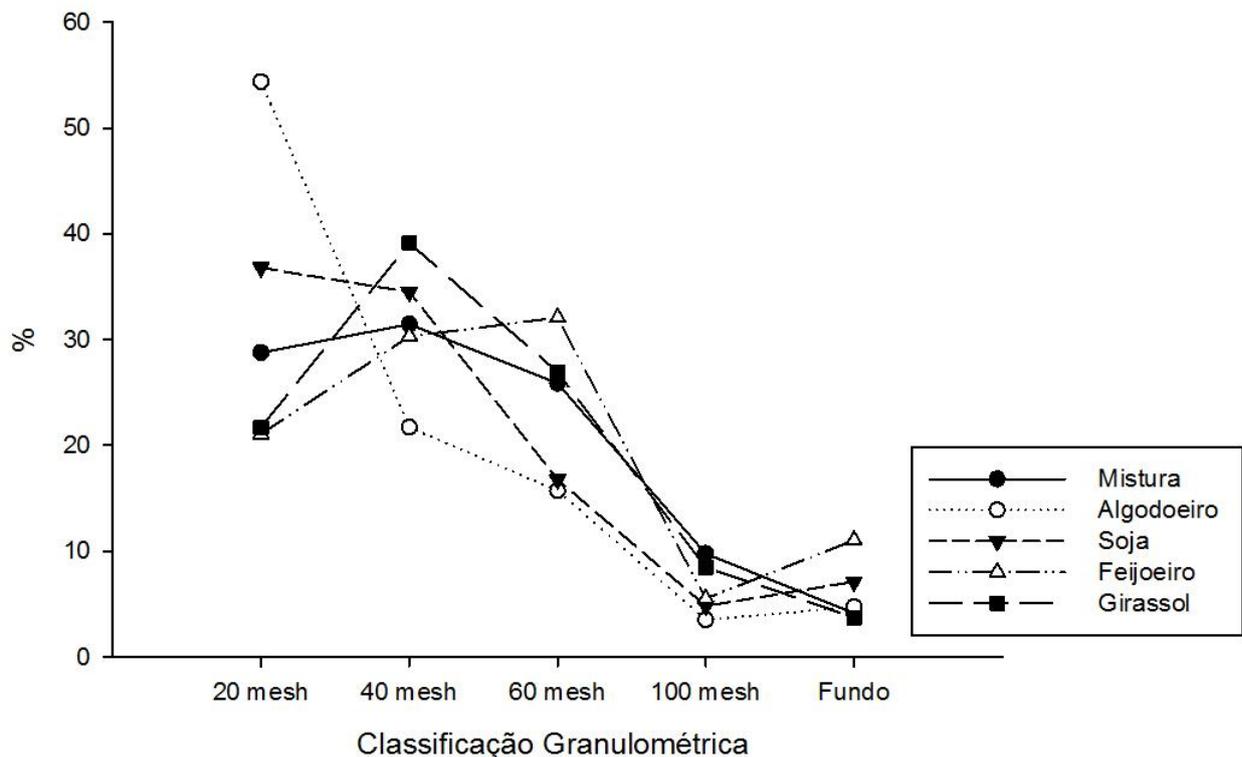


Figura 18. Classificação granulométrica (%) dos resíduos agroflorestais. Mistura: girassol/maravalha de pinus.

### 6.1.3. Densidade a granel dos resíduos agroflorestais

A densidade a granel dos resíduos variou de 156,64 kg.m<sup>-3</sup> para o algodoeiro com umidade de 11,82% até 276,82 kg.m<sup>-3</sup> para o girassol com umidade de 12,86% (Figura 19). Segundo, Souza et al. (2020) os resíduos agrícolas apresentaram valores inferiores a 250 kg.m<sup>-3</sup> com teores de umidade variando de 9% a 12%, sendo a baixa densidade destes, uma das maiores limitação à sua utilização como fonte energética. Liu et al. (2014) trabalhando com resíduos florestais e agrícolas encontraram valores de 169 kg.m<sup>-3</sup> com teor de umidade a 10,10% para a densidade a granel de serragem de pinus de 286 kg.m<sup>-3</sup> com teor de umidade a 8,16% e Pereira (2014) encontrou para resíduo de algodoeiro 179,94 kg.m<sup>-3</sup> com teor de umidade a 12,09%.

Conforme estudos, baixa densidade implica em aumento do custo do transporte e requer maior espaço para o armazenamento (JACINTO et al., 2017). Resíduos compostos por grandes quantidades de partículas mais finas terão menor quantidade de espaços vazios entre elas, portanto, maior densidade (DIAS et al., 2012). Quanto maior a densidade da biomassa, maior será a resistência à compressão destas no processo de peletização, e, portanto maior exigência de aplicação de pressão (LEAVER, 1970).

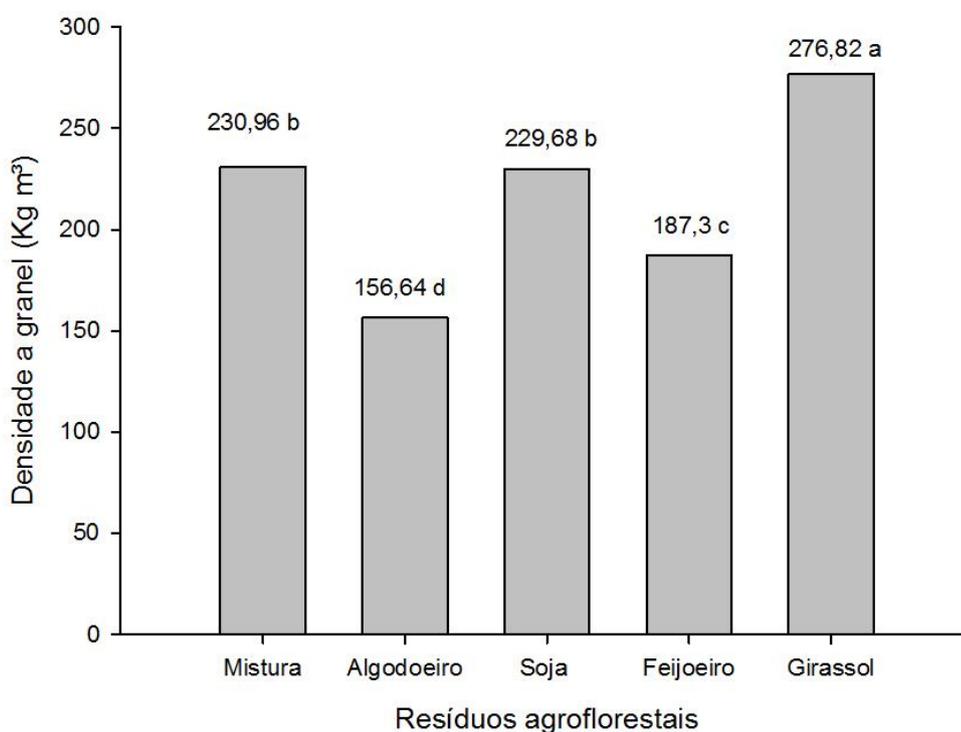


Figura 19. Densidade a granel (Dg) médio de resíduos agroflorestais estudados. Mistura: girassol/ maravalha de pinus.

#### 6.1.4. Análise imediata dos resíduos agroflorestais

Os teores médios de cinzas, material volátil e carbono fixo estão presentes na Figura 14. Observou-se que o resíduo de girassol apresentou maior teor de cinzas (6,42%), enquanto a mistura girassol/pinus, o menor teor, 2,86%, mostrando que o girassol quando misturado à madeira de pinus, melhora esta característica. Em estudos com *pellets* de casca de girassol foram encontrados valores de 2,78% de cinzas (VERMA et al., 2012), e 1,3% para *pellets* de pinus (RABAÇAL et al., 2013). Scatolino et al. (2018) relataram que, ao aumentar a porcentagem de serragem de eucalipto na composição de *pellets* (50% de serragem de eucalipto e 50% de resíduos de soja), foi observada uma diminuição de 26,72% para 14,03% no teor de cinzas de *pellets*, em comparação com o *pellet* de 100% de resíduos de soja. As cinzas são compostas de substâncias inorgânicas que não participam da combustão, portanto os ideais são baixos teores, que não afetam negativamente o poder calorífico e não causam danos nas estruturas de queimadores e aumento em frequência de limpeza (NEVES et al., 2013).

Os maiores valores médios de material volátil foram 80,45 %, 78,22 % e 79,00 %, respectivamente, para resíduos de soja, mistura, e feijoeiro, sendo a soja estatisticamente superior (Figura 20). Paula et al. (2011b) encontraram teor médio de 80,59% para resíduo de haste de soja. O teor de material volátil é uma característica importante nos combustíveis, pois facilita a ignição e a queima durante processos de combustão, emitindo os gases CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e H<sub>2</sub>, proporcionando uma taxa de combustão mais rápida (VIERA et al., 2013) (SOUZA et al., 2020).

Os teores de carbono fixo que são a parte do combustível livre de umidade, voláteis e cinzas, foram maiores para os resíduos de algodoeiro, mistura girassol/pinus e girassol, 19,28%, 19,19% e 18,67%, respectivamente, mostrando que o girassol quando misturado à madeira de pinus, melhora esta característica, que em maiores quantidades melhoram energeticamente a biomassa, permitindo maior residência do combustível em aparelhos de queima e queima mais lenta (OLIVEIRA et al., 2010). Yang et al. (2021) encontrou teores de 15,03% para resíduo de caule de algodão, inferior ao encontrado neste estudo.

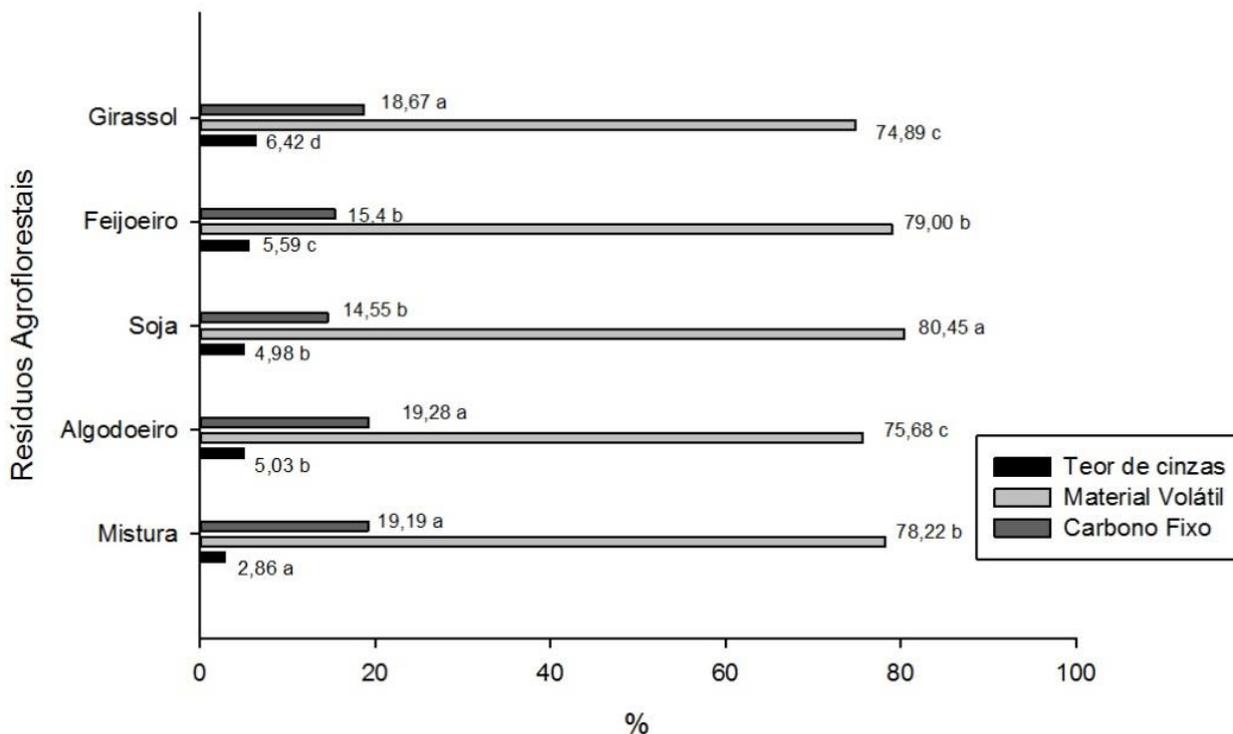


Figura 20. Teor de cinzas (CZ), material volátil (MV) e carbono fixo (CF) médio dos resíduos agroflorestais. *Mistura: girassol/ maravalha de pinus.*

### 6.1.5. Análise elementar dos resíduos agroflorestais

Os resultados da análise elementar (teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio) dos resíduos agroflorestais encontram-se na Figura 21. Influenciada pela presença da madeira de pinus, a mistura girassol/pinus apresentou os maiores valores para carbono (44,23%) e hidrogênio (6,23%), em relação ao girassol puro (39,97%), seguida do algodão (41,52%). Visando a produção de bioenergia, altos teores de carbono e hidrogênio e baixos teores de oxigênio e cinzas são desejáveis (PAULA et al., 2011b) (CHOI; SUDIARTO, 2014).

Os maiores valores de carbono e hidrogênio na mistura girassol/pinus se devem à presença da madeira, pois o conteúdo desses componentes é maior na biomassa lenhosa do que herbácea ou agrícola, conforme Obernberger e Thek (2010). Em alguns estudos com *pellets* de resíduos foram encontrados alto teores de carbono e hidrogênio, como *pellets* de

casca de girassol com teor de carbono de 49,90% e de hidrogênio de 6,20 %, segundo Verma et al. (2012), enquanto Protasio et al. (2012) encontram teores 49% de carbono e 6,65% de hidrogênio para maravalha de pinus.

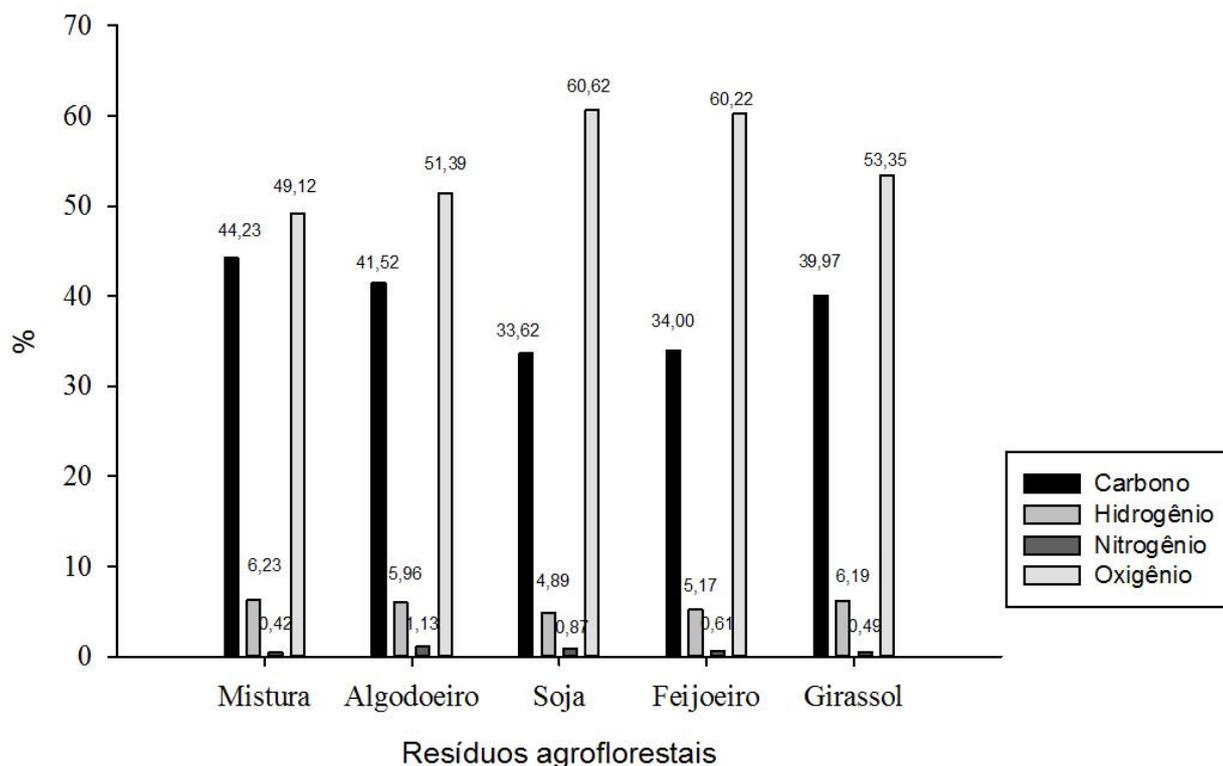


Figura 21. Teor de carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio dos resíduos agroflorestais. Mistura: girassol/ maravalha de pinus.

### 6.2.6. Análise química dos resíduos agroflorestais

Os teores de extrativos, lignina insolúvel, solúvel e total, cinzas sem extrativos e holocelulose dos resíduos de algodoeiro, soja, feijoeiro e girassol são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Valores médios dos teores de extrativos, cinzas sem extrativos, holocelulose e lignina insolúvel, solúvel e total dos resíduos agrícolas.

Características químicas	Resíduos agrícolas			
	Algodoeiro	Soja	Feijoeiro	Girassol
Extrativos	5,88 a	6,06 a	4,05 a	20,29 b
(%)	(9,69)	(5,11)	(10,37)	(24,10)
Lignina insolúvel	20,05 a	17,30 a	12,24 b	12,84 b
(%)	(5,73)	(7,51)	(6,86)	(10,66)
Lignina solúvel*	2,80	2,23	2,50	3,28
(%)	(16,78)	(4,48)	(13,60)	(12,19)
Lignina total	22,85 a	19,53 ab	14,75 c	16,13 bc
(%)	(5,51)	(6,69)	(7,93)	(6,01)
Cinzas 525°C	2,76 b	3,41 c	2,25 a	3,83 d
(%)	(1,81)	(2,34)	(8,44)	(3,91)
Holocelulose	68,51 bc	71,00 ab	78,94 a	59,76 c
(%)	(2,55)	(1,70)	(1,38)	(9,22)

Obs: Médias seguidas da mesma letra, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p > 0,05$ ), entre parênteses são os coeficientes de variação em %; (\*) sem diferença significativa.

A partir dos valores médios observou-se que os resíduos de feijoeiro, algodoeiro e soja apresentaram os menores teores de extrativos (4,05%, 5,88% e 6,06% respectivamente), os quais são constituídos principalmente de gorduras, ácidos resinosos, terpenos e fenóis. No processo de peletização os extrativos diminuem a necessidade de energia, pois atuam como lubrificantes e plastificantes, mas, ao mesmo tempo, dificultam o contato estreito entre os sítios de ligação das partículas lignocelulósicas, gerando pellets de menor resistência, devido a formação de uma camada limite fraca que impede a ligação das partículas (CASTELLANO et al., 2015). Estudo com resíduo de haste de soja obteve teor de 6,87% de extrativos (PAULA et al., 2011b). Lavergne et al. 2021 encontraram para *pellet* de casca de girassol teores de extrativos de 10,7%.

O resíduo do algodão apresentou o maior teor de lignina total (22,85%), estatisticamente semelhante ao encontrado para o resíduo de soja (19,53%). Essa informação coloca ambos os resíduos em lugar de destaque para a utilização de energia na forma *in natura* e como *pellets*, uma vez que a relação entre lignina e produção de energia é positiva, além do fato de que na produção de *pellets*, a lignina tem a função adesiva entre as partículas.

No processo de peletização, a biomassa é pressionada por roletes através de canais de compressão cilíndricos e convertida em material aglomerado devido ao comportamento termoplástico da lignina que favorece a aglutinação das partículas. O aquecimento da biomassa acima da temperatura de transição vítrea torna-a macia e com propriedades termoendurecíveis, que ajuda na construção de pontes sólidas e desempenha papel importante na peletização de biomassa, produzindo *pellets* mais duráveis e facilitando a logística de transporte (CASTELLANO et al., 2015).

Biomassas com maior teor de lignina e baixo conteúdo extrativo produzem *pellets* mais duráveis, como os resíduos de algodoeiro. Portanto altos teores de lignina são desejáveis tanto na peletização quanto na combustão dos *pellets*, pois contribui para o aumento do poder calorífico e da durabilidade mecânica do combustível sólido produzido (CASTELLANO et al., 2015). Em estudos com resíduos de hastes de algodão, Liu et al. (2014) encontraram teores de 27% de lignina, superiores ao encontrado neste estudo. Lavergne et al. 2021 encontraram para *pellet* de casca de girassol teores 25,9% de lignina, superiores ao encontrado neste estudo.

Tanto os resíduos de soja quanto de feijão apresentaram teores de holocelulose semelhantes, com valores de 71,00% e 78,94%, respectivamente, não diferindo estaticamente entre si. A holocelulose é constituída por celulose, com estrutura semi-cristalina resistente à hidrólise, e por hemiceluloses com estrutura amorfa, ramificada e baixa massa molecular com pouca resistência e facilmente hidrolisada. Para a produção de energia, altos teores de lignina e baixos teores de holocelulose são desejáveis (BUFALINO et al., 2013). Em um estudo usando resíduos de caule de soja Paula et al. (2011b) encontraram conteúdo de holocelulose de 69,21%. Valor próximo aos valores de resíduos de algodoeiro e soja encontrados neste estudo.

#### **6.1.7. Poder calorífico superior, poder calorífico inferior, poder calorífico útil e densidade energética dos resíduos agrofloretais**

A análise energética dos resíduos foi realizada a partir da determinação do poder calorífico superior, poder calorífico útil e densidade energética cujos valores médios são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI), poder calorífico útil (PCU) e densidade energética (Deg) dos resíduos agroflorestais.

Características	Resíduos agroflorestais				
	Mistura	Algodoeiro	Soja	Feijoeiro	Girassol
PCS (MJ.kg <sup>-1</sup> )	19,15 a (0,11)	18,35 c (0,08)	18,67 b (0,17)	17,81 d (0,38)	16,81 e (0,28)
PCI (MJ.kg <sup>-1</sup> )	19,06 a (0,19)	18,10 c (0,19)	18,50 b (0,19)	17,68 d (0,20)	16,70 e (0,23)
PCU (MJ.kg <sup>-1</sup> )	16,84 a (0,11)	15,67 c (0,08)	15,97 b (0,18)	15,15 d (0,39)	14,23 e (0,29)
Deg (GJ.m <sup>-3</sup> )	3,88 a (1,53)	2,45 c (2,48)	3,66 a (1,35)	2,83 b (2,02)	3,93 a (1,96)

Obs: Médias seguidas da mesma letra, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p > 0,05$ ), entre parênteses são os coeficientes de variação em %. Mistura: girassol/ maravalha de pinus.

O poder calorífico é a quantidade de energia liberada na combustão completa de uma unidade de massa do material combustível, sendo expresso de três formas: poder calorífico superior- PCS, poder calorífico inferior- PCI e poder calorífico útil - PCU. O PCS representa a energia total que pode ser liberada na oxidação de um combustível incluindo o calor latente de vaporização da água, o PCI o calor latente de água é retirado, e PCU é a energia total que pode ser liberada na oxidação de um combustível na umidade atual em que o combustível encontra-se (LEITE et al., 2014; FERNANDES et al., 2013).

Observou-se que o resíduo de soja apresentou o maior poder calorífico superior (18,67 MJ.kg<sup>-1</sup>), fator esse influenciado positivamente pelos materiais voláteis e pelo carbono fixo (NHUCHHEN; SALAM, 2012). Valor igual a 16,70 MJ.kg<sup>-1</sup> foi encontrado por Scatolino et al. (2018) para resíduo de soja. O girassol apresentou o menor valor de 16,81 MJ.kg<sup>-1</sup>, devido a alta presença de cinzas, que influencia negativamente o poder calorífico além de aumentar os custos devido a corrosão e ao gerenciamento de equipamentos da caldeira (GARCIA et al.,

2013). Mas quando o resíduo de girassol é misturado à madeira de pinus, o valor do poder calorífico superior aumenta para  $19,15 \text{ MJ.kg}^{-1}$ . Poder calorífico superior de  $19,37 \text{ MJ.kg}^{-1}$  foram encontrados para *pellets* comerciais de madeira de pinus (SCATOLINO et al., 2018) e de  $20,27 \text{ MJ.kg}^{-1}$  para *pellets* de casca de girassol (VERMA et al., 2012).

A mistura girassol/pinus apresentou o maior poder calorífico útil ( $19,15 \text{ MJ.kg}^{-1}$ ), devido seu alto poder calorífico superior e baixo teor de umidade (10,30%) em comparação com os outros resíduos. O poder calorífico pode ser influenciado positivamente pela quantidade de carbono e hidrogênio e negativamente pelas cinzas, oxigênio, umidade e quantidade de nitrogênio (PAULA et al., 2011b). Como pode ser observado neste trabalho, em que a mistura girassol/pinus apresentou alto teor de carbono (44,23%) e hidrogênio (6,23%) e baixo teor de cinzas (2,86%).

O girassol, a mistura girassol/pinus e a soja apresentaram maiores densidade energética,  $3,93 \text{ GJ.m}^{-3}$ ,  $3,88 \text{ GJ.m}^{-3}$  e  $3,66 \text{ GJ.m}^{-3}$ , respectivamente. O girassol apresentou o menor poder calorífico útil ( $14,23 \text{ MJ.kg}^{-1}$ ), no entanto a sua densidade energética foi elevada, devido a elevada densidade a granel ( $276,82 \text{ kg.m}^{-3}$ ). Por outro lado tanto a mistura girassol/pinus quanto a soja apresentaram elevados valores de densidade a energética, devido a seus altos poder caloríficos ( $16,84 \text{ MJ.kg}^{-1}$  e  $15,97 \text{ MJ.kg}^{-1}$ ) e valores intermediários de densidades a granel de ( $230,96 \text{ kg.m}^{-3}$  e  $229,68 \text{ kg.m}^{-3}$ ) sendo esses estatisticamente iguais.

A densidade energética indica a quantidade de energia produzida por unidade volumétrica, que neste caso, é volume do granel de resíduos (PEREIRA, 2014). A densidade aparente tem maior influência sobre a densidade energética, devido a uma ampla faixa de ocorrência, ao contrário do poder calorífico que ocorre em uma faixa estreita (VALE et al., 2017). Valor de  $2,65 \text{ GJ.m}^{-3}$  foi encontrado para resíduo de casca de cafeeiro com densidade a granel de  $171,46 \text{ kg.m}^{-3}$  conforme Souza et al. (2020), e de  $3,87 \text{ GJ.m}^{-3}$  para casca de arroz com densidade a granel de  $296 \text{ kg.m}^{-3}$  conforme Liu et al. (2014).

## **6.2. CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE PELLETS NÃO TORRADOS DE RESÍDUOS AGROFLORESTAIS**

Cinco tipos de *pellets* foram produzidos e analisados: *pellets* de resíduo de algodoeiro, girassol, feijoeiro, soja e de mistura contendo 50% de resíduo de maravalha de Pinus e 50% de Girassol (Figura 22).



Figura 22. Pellets não torrados: de Algodoeiro (100%), Girassol (100%), Feijoeiro (100%), Soja (100%) e Mistura (50% de maravalha de Pinus e 50% de Girassol).

Conforme a Tabela 5, todos os *pellets* atendem as exigências da norma ISO 17225-6 quanto ao diâmetro e ao comprimento, pois os diâmetros variaram entre 6,07 - 6,36 mm e os comprimentos variaram entre 24,29 - 25,65 mm. Scatolino et al. (2018) trabalhando com *pellets* de soja, encontraram valores de diâmetro de 6,47 e comprimento de 17,23 mm, semelhante ao encontrado no trabalho. Segundo SAID et al. (2015), *pellets* com comprimento uniforme auxiliam no escoamento suave da matéria-prima dentro do dispositivo conversor de energia, enquanto diâmetros menores oferecem uma taxa de combustão uniforme quando comparados a diâmetros maiores. Estatisticamente os melhores *pellets* foram os produzidos a partir de resíduos de algodão, soja e feijão.

Tabela 5. Especificações de qualidade exigidos para *pellets* não lenhosos, segundo a norma ISO 17225-6, para aplicações industriais e domésticas.

Propriedades	Unidade	ISO 17225-6					
		17225-6 Tipo A	Mistura	Algodoeiro	Soja	Feijoeiro	Girassol
Diâmetro	Mm	6,0 - 10,0	6,16 b	6,09 a	6,09 a	6,07 a	6,36 c
Comprimento	Mm	3,15-40,0	25,65 b	25,18 ab	24,29 a	24,92 ab	25,31 b
Densidade a granel	kg.m <sup>-3</sup>	≥600,0	577 b	636 a	564 b	619 a	470 c
Teor de umidade (base úmida)	%	≤12,0	8,81 b	8,45 a	8,90 b	9,39 c	11,20 d

Teor de cinzas	%	≤6,00	2,86 a	5,03 b	4,98 <sub>b</sub>	5,59 c	6,42 d
Poder cal. (PCI)	MJ.kg <sup>-1</sup>	≥14,1	19,06 a	18,10 c	18,50 <sub>b</sub>	17,68 d	16,70 e
Nitrogênio	%	≤1,50	0,42	1,13	0,87	0,61	0,49
Durabilidade mecânica	%	≥97,5	99,59 a	99,73 a	99,56 <sub>a</sub>	99,81 a	98,51 b
Finos	%	≤2	0,40 bc	0,30 b	0,43 c	0,18 a	1,75 d

Obs: Médias seguidas da mesma letra, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p > 0,05$ ). Mistura: girassol/ maravalha de pinus.

A densidade a granel foi o parâmetro de maior restrição aos *pellets* sendo os de algodoeiro e feijoeiro os únicos que atenderam as normas. A densidade a granel destes *pellets* foram, estatisticamente iguais e superiores aos demais. O destaque destes *pellets* quanto a densidade a granel é um fator que interfere positivamente, pois melhora as condições de armazenamento, transporte e combustão (CAO et al., 2015). Os valores de densidade do granel variaram entre 470 e 636 kg.m<sup>-3</sup>, inferiores ao encontrado por Scatolino et al. (2018) para pellet de soja (698 kg.m<sup>-3</sup>).

O teor de umidade é importante na combustão, armazenamento, e transporte dos *pellets*. Valores elevados dificulta a ignição do combustível, devido à perda de calor durante a combustão necessária para evaporar a água do material (FERNANDES et al., 2013), ao contrário, baixos teores de umidade nos pellets permitem obter maior eficiência na combustão, prolongamento do tempo de estocagem do produto, minimização da proliferação de fungos e da deterioração do material (GARCIA et al., 2013).

O teor de umidade dos *pellets* variou entre 8,41% e 11,20%, e o resíduo de algodão apresentou o menor valor, estatisticamente diferente dos demais. Verma et al. (2012) estudando *pellets* de girassol encontraram valores de 11,80%. Teores que atendem aos requisitos normativos, uma vez que a recomendação, para os pellets de resíduos agrícolas, é umidade abaixo de 12%.

O *pellet* de girassol não se adequou a norma quanto ao teor de cinzas que foi de 6,42%, sendo inferior ao encontrado por Lavergne et al. 2021, para *pellet* de casca de girassol (8,3%). No entanto, quando misturado com maravalha de pinus, apresentou o menor teor (2,86%) sendo o melhor *pellet* neste quesito, pois o ideal são baixos teores de cinzas, para não afetar negativamente o poder calorífico, não causar danos em queimadores e assim diminuir a

frequência de limpeza destes (NEVES et al., 2013). Para *pellet* de casca de girassol, Verma et al. (2012) encontraram 2,78% e para *pellets* de pinus e Miranda et al. (2015) encontraram 2,50%. A mistura de resíduos agrícolas com a madeira ou resíduos de baixo teor de cinzas é uma maneira eficaz de melhorar esta propriedade dos *pellets* (LIU et al., 2016).

Todos os pellets adequaram-se quanto ao poder calorífico inferior, sendo que o *pellet* de mistura de girassol/pinus apresentou a maior quantidade de energia (19,06 MJ.kg<sup>-1</sup>). Verma et al. (2012) observaram valores próximos para poder calorífico inferior de *pellet* de girassol (16,33 MJ.kg<sup>-1</sup>), Garcia et al. (2018) estudando *pellets* de pinus encontraram valores de 19,15 MJ.kg<sup>-1</sup>, também observando que mistura de diferentes tipos de materiais de biomassa permite melhorias as propriedades dos *pellets* (LIU et al., 2016). Isto foi observado neste trabalho na mistura de resíduos de pinus com girassol.

O nitrogênio durante a combustão é convertido em óxidos NO<sub>x</sub>, que podem resultar em chuva ácida, corrosão dos fornos e caldeiras, acidificação de solos e danos à camada de ozônio (CARROLL et al, 2012), e com isso gerar impacto ambiental associado à queima do material lignocelulósico. Os *pellets* aqui estudados atendem aos requisitos normativos e encontram-se abaixo do limite máximo especificado de 1,50% de nitrogênio. Os *pellets* de girassol apresentaram o menor teor de nitrogênio, 0,49%, ainda inferior ao encontrado por Verma et al. (2012) para *pellets* de casca de girassol (1,0%).

A durabilidade é a capacidade de materiais densificados em resistir às forças de fricção e queda, quando manuseados durante o armazenamento e transporte. Tendo a durabilidade é possível medir a resistência mecânica e o teor de finos, sendo ideais menores teores para finos e maior durabilidade mecânica, melhorando assim as condições de estocagem, de combustão e minimizando os riscos de explosão (FILBAKK et al., 2011). A norma exige resultados maiores que 97,5% para durabilidade e menores que 2% para finos como parâmetro mínimo de qualidade. Todos os *pellets* apresentaram conformidade com a norma em relação a durabilidade e teor de finos, tendo o girassol valor estatisticamente inferior aos demais. Os valores de durabilidade e teor de finos dos *pellets* estudados neste trabalho foram melhores do que os encontrados por Verma et al. (2012) para *pellets* de casca de girassol (90,28% e 12,24%, respectivamente).

A Tabela 6 mostra os valores médios da Densidade aparente (Da) e taxa de compactação de *pellets* proveniente de resíduos agrícolas *in natura*.

O *pellet* de feijoeiro (1291 kg.m<sup>-3</sup>) apresentou a densidade aparente mais elevada, fator este que influencia o comportamento da combustão e o tempo de queima, pois a presença de

vazios nos pellets controla o movimento do oxigênio, sendo ideais maiores densidade aparente correspondendo a baixas quantidades de espaços vazios (SAID et al., 2015).

As maiores taxas de compactação encontradas foram oriundas dos resíduos *in natura* de menor densidade, o algodoeiro (156,64 kg.m<sup>-3</sup>) e o feijoeiro (187,3 kg.m<sup>-3</sup>) sendo a maior taxa de compactação do algodoeiro (3,93) que diferiu estatisticamente dos demais *pellets*. Os valores de compactação do algodoeiro e do feijoeiro mostram o incremento de massa por unidade de volume em 3,93 e 3,01 vezes em relação às partículas não compactada. Pereira (2014) encontrou 3,62 vezes para peletização de resíduos de algodoeiro. Segundo Protásio et al. (2011), quanto menor a densidade a granel da matéria-prima, melhor será a acomodação das partículas e, conseqüentemente, maior será o aumento percentual da sua densidade após o processo de adensamento.

Tabela 6. Densidade aparente (Da) e taxa de compactação de *pellets* não torrados proveniente de resíduos agroflorestais *in natura*.

Características	<i>Pellets</i> não torrados				
	Mistura	Algodoeiro	Soja	Feijoeiro	Girassol
Da	1260 b	1260 b	1238 b	1291 a	1071 c
(kg.m <sup>-3</sup> )	(3,15)	(3,89)	(4,51)	(4,06)	(6,06)
Taxa de Compactação	2,18 c	3,93 a	2,34 c	3,01 b	1,28 d
	(2,19)	(2,99)	(4,02)	(2,74)	(4,69)

Obs: Médias seguidas da mesma letra, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p > 0,05$ ), entre parênteses são os coeficientes de variação em %. Mistura: girassol/ maravalha de pinus.

A Tabela 7 mostra os valores médios de Poder calorífico superior (PSC) e Poder calorífico útil (PCU) de *pellets* proveniente de resíduos agroflorestais *in natura*.

O *pellet* de mistura girassol/pinus apresentou maior poder calorífico superior (19,15 MJ.kg<sup>-1</sup>) devido a presença da madeira de pinus, pois quando analisado individualmente o girassol apresentou o menor valor (16,81 MJ.kg<sup>-1</sup>). O poder calorífico útil da mistura foi também o maior devido ao alto poder calorífico superior e também ao baixo teor de umidade. Miranda et al. (2015) encontrou poder calorífico superior para *pellet* de pinus de 19,70 MJ.kg<sup>-1</sup>.

1.

Tabela 7. Poder calorífico superior (PSC) e Poder calorífico útil (PCU) de *pellets* não torrados proveniente de resíduos agrícolas *in natura*.

Características	<i>Pellets</i> não torrados				
	Mistura	Algodoeiro	Soja	Feijoeiro	Girassol
PCS (MJ.kg <sup>-1</sup> )	19,15 a (0,11)	18,35 c (0,08)	18,67 b (0,17)	17,81 d (0,38)	16,81 e (0,28)
PCU (MJ.kg <sup>-1</sup> )	17,14 a (0,11)	16,36 c (0,08)	16,63 b (0,17)	15,78 d (0,39)	14,55 e (0,28)

Obs: Médias seguidas da mesma letra, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p > 0,05$ ), entre parênteses são os coeficientes de variação em %. Mistura: girassol/ maravalha de pinus.

A Figura 23 apresenta os valores das Densidades energéticas a granel e sólida de *pellets* não torrados.

O *pellet* de algodoeiro apresentou maior densidade energética a granel (10,42 GJ.m<sup>-3</sup>), devido a alta densidade a granel deste resíduo (636 kg.m<sup>-3</sup>), valores semelhantes ao encontrados por Pereira (2014) (10,31 GJ.m<sup>-3</sup>). O *pellet* de mistura girassol/pinus apresentou maior densidade energética sólida, devido seu alto poder calorífico útil (17,14 MJ.kg<sup>-1</sup>) e densidade de 577 kg.m<sup>-3</sup>. *Pellets* com maior densidade energética proporcionam ganhos logísticos no transporte do combustível, transportando maior massa de *pellets* em um menor volume de carga, barateando o custo final do serviço e tornando esse biocombustível mais competitivo (PEREIRA et al., 2016; GARCIA et al., 2013; GARCIA et al., 2018).

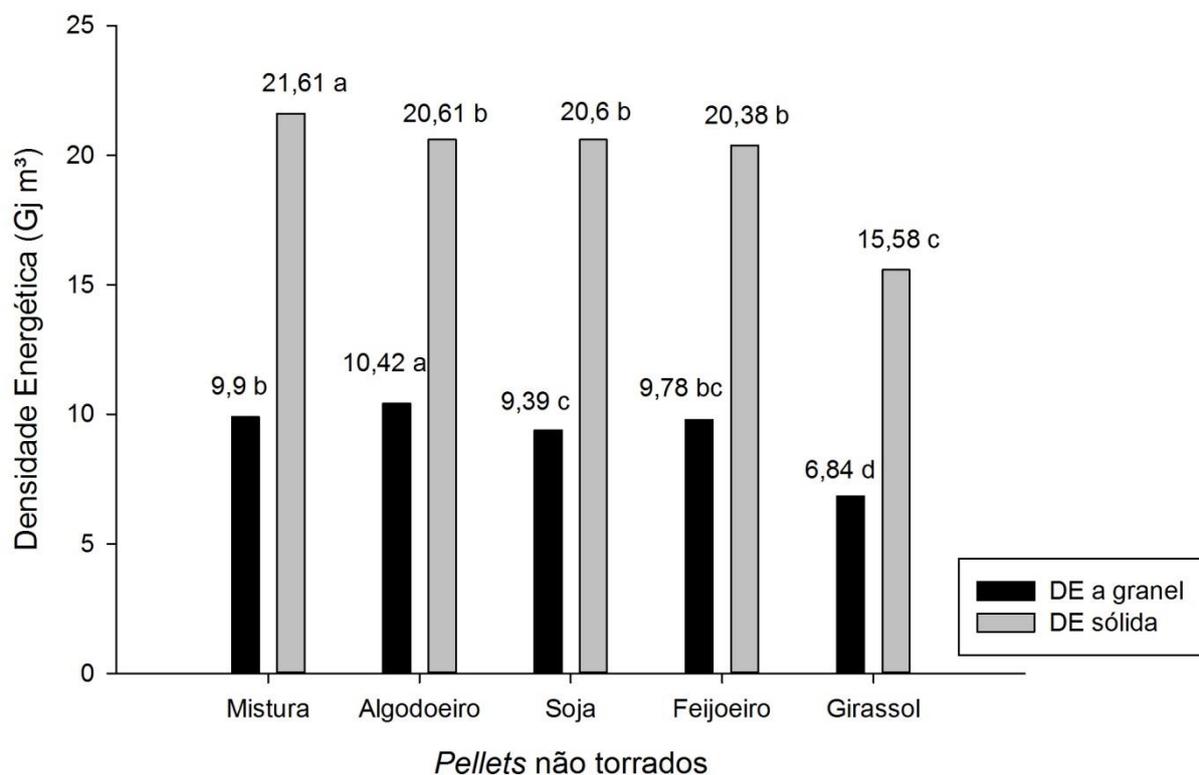


Figura 23. Densidade energética a granel e sólida de pellets não torrados. Obs: Médias seguidas da mesma letra, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p > 0,05$ ). Mistura: girassol/ maravalha de pinus.

### 6.3. CARACTERIZAÇÃO DE PELLETS TORRADOS DE RESÍDUOS AGROFLORESTAIS

Foram produzidos e analisados cinco tipos de *pellets* torrados, *pellets* torrados de resíduo de algodoeiro, girassol, feijoeiro, soja e de mistura contendo 50% de resíduo de maravalha de Pinus e 50% de Girassol (Figura 24).

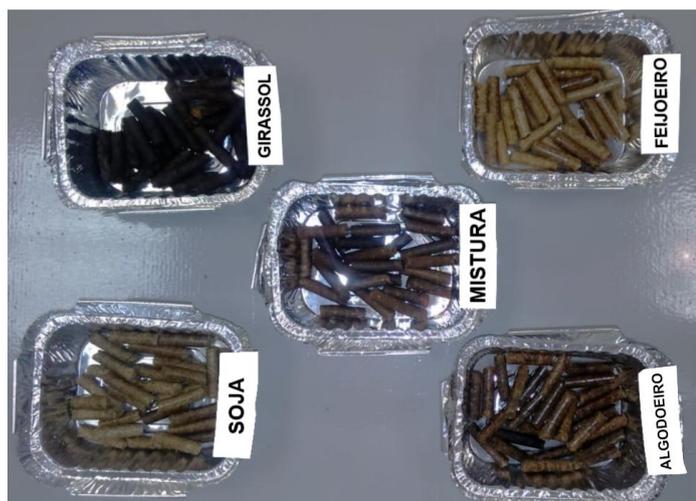


Figura 24. Pellets torrados: de Algodoeiro, Girassol, Feijoeiro, Soja e Mistura (50% de maravalha de Pinus e 50% de Girassol).

Os valores médios das Propriedades físicas e energéticas de *pellets* torrados oriundos de resíduos agroflorestais são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Valores médios das propriedades físicas e energéticas de *pellets* torrados oriundos de resíduos agroflorestais.

Propriedades	Unidade	Mistura	Algodoeiro	Soja	Feijoeiro	Girassol
Diâmetro	Mm	6,18 b	5,94 a	5,93 a	5,88 a	6,56 c
Comprimento	Mm	24,77 bc	23,98 ab	23,50 a	24,82 bc	25,24 c
Densidade a granel	kg.m <sup>-3</sup>	504 c	615 a	538 b	564 b	353 d
Teor de umidade (base úmida)	%	3,82 b	2,44 a	2,39 a	2,32 a	3,67 b
Teor de cinzas	%	3,22 a	4,16 b	3,56 a	5,74 c	7,86 d
Poder cal. (PCI)	MJ.kg <sup>-1</sup>	20,42 a	19,53 c	19,45 d	18,57 e	19,70 b
Nitrogênio	%	0,48	0,96	1,01	0,86	0,51
Durabilidade	%	99,55 a	99,69 a	99,70 a	99,70 a	99,18 b
Finos	%	0,51 b	0,30 a	0,30 a	0,31 a	0,80 c

Obs: Médias seguidas da mesma letra, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p > 0,05$ ). Mistura: girassol/ maravalha de pinus. mm= milímetros.

Observa-se que a torrefação gerou diminuição nos diâmetros dos *pellets* de algodoeiro, soja e feijoeiro, abaixo dos valores mínimos de 6,00 mm. A redução dos diâmetros e

comprimentos ocorre devido a decomposição parcial, principalmente das hemiceluloses durante o processo de torrefação levando a perda de massa (PRINS et al., 2006). Além disso, os *pellets* tinham água de adesão antes da torrefação creditando-se à perda desta água com outro fator de redução do diâmetro e comprimento dos *pellets*. Fato observado nos pellets de algodoeiro, soja e feijoeiro, *pellets* não torrados apresentaram diâmetros de 6,07 mm a 6,09 mm e comprimentos de 24,29 mm a 25,18 mm e já os *pellets* torrados apresentaram diâmetros de 5,88 mm a 5,94 mm e comprimentos de 23,50 mm a 24,82 mm.

Os *pellets* torrados de algodoeiro apresentaram densidades superiores a  $\geq 600 \text{ kg.m}^{-3}$ , valor mínimo estipulado para a classe de *pellets* da mais alta qualidade feitos de biomassa não lenhosa termicamente tratada (KHALSA et al., 2016). As densidades dos *pellets* torrados apresentaram-se inferiores aos *pellets* não torrados, em função da ação do calor e consequente perda de massa durante a torrefação (LI et al., 2012 a,b; PENG et al., 2013 a). Fato observado para todos os *pellets*, *pellets* não torrados apresentaram densidades de  $470 \text{ kg.m}^{-3}$  a  $636 \text{ kg.m}^{-3}$  e após a torrefação a  $250^\circ\text{C}$  por 30 min apresentaram perda de densidades de  $353 \text{ kg.m}^{-3}$  a  $615 \text{ kg.m}^{-3}$ .

Além da perda de massa, ocorre uma modificação da microestrutura da biomassa oriunda da torrefação (LI et al., 2012 b; MISLJENOVIC et al., 2014). Conforme uma porção da hemicelulose é removida e algumas paredes celulares na biomassa são destruídas, há formação de uma estrutura tubular e consequentemente a geração de lacunas e vazios entre as partículas (YILDIZ et al., 2006), resultando em uma estrutura fibrosa mais frágil e ligações também frágeis das partículas de biomassa torrada (MISLJENOVIC et al., 2014; KALIYAN; MOREY, 2010; STELTE et al., 2011a).

Outra consequência da torrefação é a perda de compostos de baixo poder colorífico que atuam como agentes de ligação em estado vítreo, associado à perda de água de constituição (quimicamente ligada) (LI et al., 2012 b). *Pellets* torrados de pinus apresentaram redução em densidade a granel de  $689,91 \text{ kg.m}^{-3}$  para  $684,14 \text{ kg.m}^{-3}$  após torrefação (GARCIA et al., 2018).

O teor de umidade dos *pellets* torrados foram inferiores ao valor máximo de 10% de umidade estabelecida para a classe de *pellets* da mais alta qualidade feitos de biomassa não lenhosa termicamente tratada (KHALSA et al., 2016), sendo que os *pellets* de algodoeiro, soja e feijoeiro apresentaram os menores teores de umidade em relação ao demais. A torrefação altera a natureza higroscópica da biomassa para hidrofóbica, permitindo a redução significativa da umidade saturada, gerando um material consistente e homogêneo, em virtude

da desidratação durante o processo, levando a liberação de voláteis leves e umidade (BATIDZIRAI et al., 2013; LI et al., 2012 a; PENG et al., 2013 a,b; CHEW; DOSHI, 2011). Baixo teor de umidade facilita o armazenamento, permitindo períodos de armazenamento mais longos (OLSSON; HILLRING, 2014). Acácia e albasia com umidades de 5,34% e 7,83% após a torrefação a 250°C por 20 min apresentaram perda de umidade atingindo teores de 2,15% e 2,00%, respectivamente (KIM et al., 2015). Fato observado para todos os *pellets*, *pellets* não torrados apresentaram umidades de 8,45% a 11,20% e após a torrefação a 250°C por 30 min apresentaram perda de umidade atingindo teores de 2,32% a 3,67%.

O *pellet* torrado de mistura girassol/pinus juntamente com o *pellet* de soja, destacaram-se apresentando os menores teores de cinzas, 3,22% e 3,53%, respectivamente. No entanto, estes valores são superiores àqueles da condição de não torrados, isto ocorre porque segundo Chen et al. (2014), a perda de massa durante o processo de torrefação permite o aumento de cinzas, devido à mudança da base de cálculo de massa de *pellets* não torrados para massa de *pellets* torrados. Fato observado para todos os *pellets*, em *pellets* não torrados apresentaram teores de cinzas de 2,86% a 6,42% e após a torrefação a 250°C por 30 min apresentaram ganho em cinzas atingindo teores de 3,22% a 7,86%. Os teores de cinzas devem ser de, no máximo, 5,00% de cinzas na sua constituição química (KHALSA et al., 2016).

O teor de cinzas é um bom parâmetro para uma primeira e rápida avaliação da qualidade da biomassa, que precisa ser controlada no pellet, pois, se já for alta, só aumentará durante a torrefação (DUCA et al., 2014; KHALSA et al., 2016). Altos teores de cinzas reduzem o poder calorífico e aumentam a corrosão da caldeira e os custos de gestão dos equipamentos (GARCIA et al., 2013). Satpathy et al. (2014) relatou maior teor de cinzas para as palhas de trigo e cevada torradas em comparação com a biomassa não torrada em experimentos de torrefação a 250°C com tempo de residência de 15 minutos, aumento de 34% e 58% para trigo e cevada, respectivamente.

O poder calorífico inferior dos *pellets* torrados foram superiores a 18,0 MJ.kg<sup>-1</sup>, atendendo ao padrão de biomassa tratada termicamente (KHALSA et al., 2016), sendo os *pellets* de mistura girassol/pinus apresentado a maior quantidade de energia por unidade de volume, permitindo melhorar as características dos pellets para uso energético. A torrefação melhora o poder calorífico na medida em que ocorre remoção substancial da hemicelulose (PHANPHANICH; MANI, 2011; PENG et al., 2013 a), associado a redução da umidade e o aumento da concentração de carbono devido à remoção das hemiceluloses de baixo teor de carbono (SONG et al., 2018). Ganhos em poder calorífico superior foi observado em *pellets*

de pinheiro silvestre a 250°C por 60 minutos, passando de 18,37 MJ.kg<sup>-1</sup> para 21,35 MJ.kg<sup>-1</sup>, após a torrefação (SHANG et al., 2012). Fato observado para todos os *pellets*, *pellets* não torrados apresentaram poder calorífico inferior de 16,70 MJ.kg<sup>-1</sup> a 19,06 MJ.kg<sup>-1</sup> e após a torrefação a 250°C por 30 min apresentaram ganho em poder calorífico inferior atingindo teores de 18,57 MJ.kg<sup>-1</sup> a 20,42 MJ.kg<sup>-1</sup>

Os *pellets* torrados apresentaram teores de nitrogênio inferiores ao exigido pelas normas (1,50%), sendo ideais baixos teores de nitrogênio. Em trabalhos de torrefação com madeira de cedro a 240 °C por 30 minutos observou-se a redução do teor de nitrogênio de 0,65% para 0,28% (CAO et al., 2015), possibilitando assim a diminuição da formação e emissões de gases de NOx. Neste trabalho a queda no teor de nitrogênio foi observada apenas para os *pellets* torrados de algodão de 1,13% para 0,96 %. HU et al. (2018), na torrefação de resíduo de caule de milho encontraram ganhos em nitrogênio de 0,60% para 0,82 % a 250°C por 30 minutos.

Tem sido observada em alguns trabalhos que *pellets* de maior densidade não apresentam necessariamente maior durabilidade e que a durabilidade dos *pellets* torrados foram inferior à dos *pellets* feitos de biomassa não torrada (SONG et al., 2018). No presente estudo a durabilidade dos *pellets* torrados não apresentaram-se inferiores aos *pellets* não torrados, ou seja, a durabilidade dos *pellets* não foi prejudicada com o processo de torrefação, apresentando valores superiores a  $\geq 97,5\%$  e teores de finos inferiores a  $\leq 2,0\%$ , atendendo, inclusive, o requisito de qualidade. *Pellets* densos caracterizam alta resistência mecânica, quebra mínima durante o manuseio, transporte e armazenamento, permitindo melhor comercialização (ADHIKARI et al., 2019).

A Figura 25 apresenta os valores médios Teor de cinzas (CZ), material volátil (MV) e carbono fixo (CF) de *pellets* torrados.

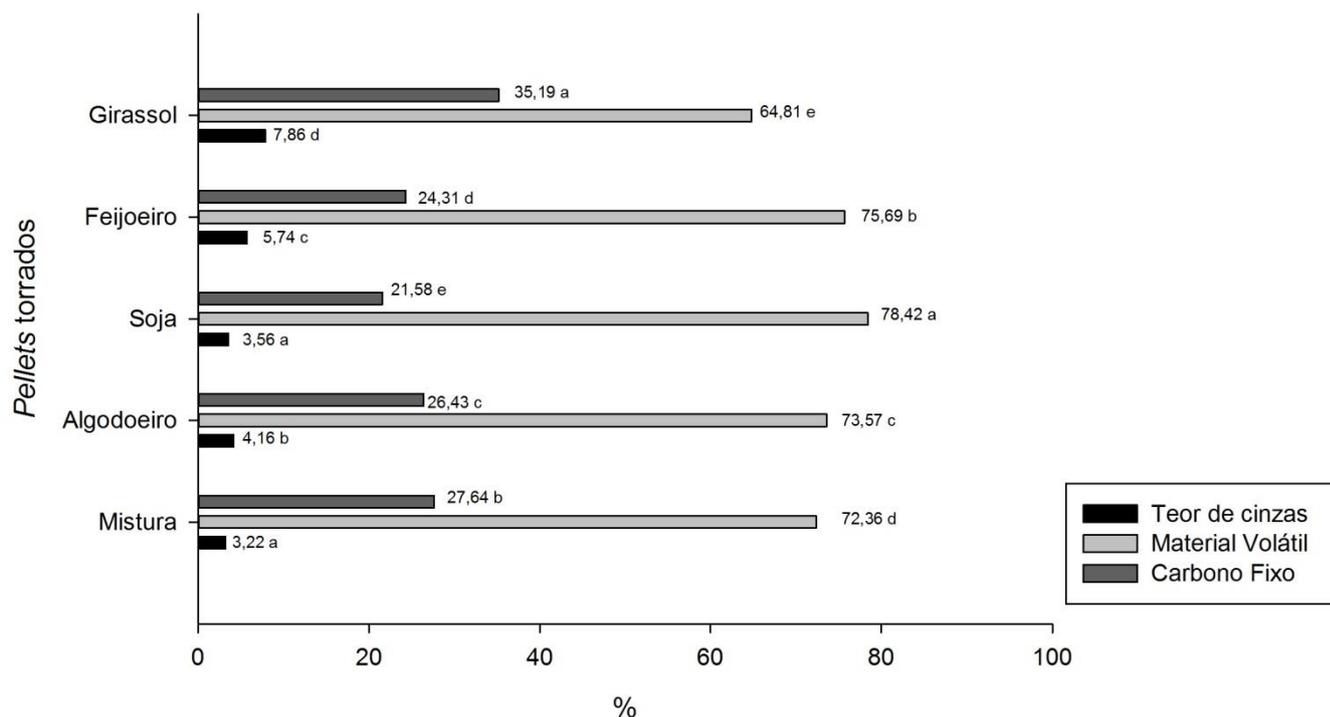


Figura 25. Teor de cinzas (CZ), material volátil (MV) e carbono fixo (CF) de *pellets* torrados. Mistura: girassol/ maravalha de pinus.

Observando-se a Figura 25, verifica-se que o *pellet* torrado de girassol apresentou o maior teor de carbono fixo (35,19%) sendo estatisticamente superiores aos outros *pellets*, sendo que a torrefação aumentou o carbono fixo dos *pellets* em 16,52%, mas também apresentou o maior teor de cinzas (7,86%) sendo que a torrefação aumentou o teor de cinzas em 1,44%. Quando misturado com a maravalha de pinus o teor de cinzas diminuiu (3,22%), sendo o melhor estatisticamente seguido do *pellet* de soja, corroborando mais uma vez que mistura de resíduos podem melhorar as características dos produtos densificados (COSTA et al., 2019). O *pellet* de soja apresentou maior teor de material volátil (78,42 %) sendo que a torrefação removeu os voláteis dos *pellets* em 2,52%. Dessa forma, a torrefação permitiu ganhos em cinzas e carbono fixo, e redução em voláteis. Corroborando com os resultados encontrados, Silva et al. (2017), estudando torrefação de resíduo de casca de coco a 230°C por

60 minutos, observaram ganho em cinzas (54%) e carbono fixo (48 %) e perdas de voláteis (34%).

Devido à perda de massa durante a torrefação há uma tendência de aumento do teor de cinzas, o qual é resultante da retirada de água higroscópica e à remoção de matérias voláteis (CHEN et al., 2014) com influência positiva sobre o poder calorífico, devido a maior proporção de carbono fixo (CAO et al., 2015). O carbono fixo permite uma queima de forma constante, enquanto os materiais voláteis têm maior reatividade térmica (PODDAR et al., 2014).

A Tabela 9 apresenta os valores médios dos Rendimentos de massa e energia para *pellets* torrados em temperatura final de 250°C, taxa de aquecimento de 5°C/min e tempo de residência de 30 minutos.

Tabela 9. Rendimento de massa e energia para *pellets* torrados em temperatura final de 250°C, taxa de aquecimento de 5°C/min e tempo de residência de 30 minutos.

Pellets torreficados	Rendimento de massa (%)	Rendimento de energia (%)
Mistura	77,64 b	83,54 b
Algodoeiro	84,05 a	90,42 a
Soja	86,15 a	90,66 a
Feijoeiro	84,78 a	89,30 a
Girassol	68,72 c	81,02 b

Obs: Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (p > 0,05). Mistura: girassol/ maravalha de pinus.

Observa-se que os maiores e melhores rendimentos gravimétrico e energético foram encontrados para *pellets* de soja, (86,15% e 90,66%), de feijoeiro, (84,78% e 89,30%) e de algodoeiro, (84,05% e 90,42%). O rendimento gravimétrico está inversamente relacionado com a temperatura de torrefação (ZHANG et al, 2018). Segundo estudo, a perda de peso durante o processo de torrefação é oriundo da decomposição principalmente de hemiceluloses, seguida por celulose e lignina (PRINS et al., 2006). A decomposição das hemiceluloses e a liberação de voláteis são intensificadas em temperaturas entre 235 e 275°C (CHEN; KUO, 2011; CHEN et al., 2015).

Biomassa torrada com melhores características apresenta rendimento gravimétrico de 70% e contém 90% de rendimento energético (TRAN et al., 2013; SARKAR et al., 2014). Rendimento energético de agro-*pellets* são menores que 80% sob condições de torrefação acima de 270 °C e rendimento gravimétrico de agro-*pellets* variaram de 78% a 88% sob condições de torrefação de 250°C a 30 min, que segundo o estudo as condições de torrefação adequadas para agro-*pellets* envolvem temperaturas abaixo de 250 °C e um intervalo de tempo de torrefação de 30 min (PARK et al., 2020). Já neste estudo os rendimentos energéticos foram superior a 80% e rendimento gravimétrico variaram de 68,72% a 86,15% sob condições de torrefação de 250°C a 30 min.

A Tabela 10 mostra os valores médios da Densidade aparente (DA), do poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico útil (PCU) de *pellets* torrados.

Tabela 10. Densidade aparente (DA), poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico útil (PCU) de *pellets* torrados.

Características	<i>Pellets</i> torrados				
	Mistura	Algodoeiro	Soja	Feijoeiro	Girassol
Da (kg.m <sup>-3</sup> )	1029 d (5,31)	1155 b (4,16)	1123 c (5,63)	1211 a (4,36)	731,4 e (10,21)
PCS (MJ.kg <sup>-1</sup> )	20,53 a (0,27)	19,75 c (0,33)	19,68 d (0,01)	18,76 e (0,20)	19,82 b (0,04)
PCU (MJ.kg <sup>-1</sup> )	19,54 a (0,27)	18,99 b (0,33)	18,92 c (0,01)	18,08 d (0,20)	18,89 c (0,04)

Obs: Médias seguidas da mesma letra, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p > 0,05$ ), entre parênteses são os coeficientes de variação em %. Mistura: girassol/ maravalha de pinus.

Observa-se que o *pellet* de feijoeiro apresentou a maior densidade aparente (1211 kg.m<sup>3</sup>) sendo reduzida em 6,19% em relação ao *pellet* não torrado. Em estudos de *pellets* de pinus torrados foi encontrada uma redução de 11,70% para torrefação a 250°C, tempo de residência de 30 minutos, com taxa de aquecimento de 1,67°C/ min diferente da utilizada nesse estudo (PROTÁSIO et al., 2015), ocasionada pela perda de massa durante o processo de torrefação, oriundo da degradação dos compostos químicos da parede celular, principalmente as hemiceluloses (NHUCHHEN et al., 2014).

O *pellet* de mistura girassol/pinus apresentou maior poder calorífico superior (20,23 MJ.kg<sup>-1</sup>) devido sua composição que apresenta resíduo de girassol e maravalha de pinus que tem alto valor de poder calorífico. Protásio et al. (2015) encontraram para *pellets* torrados de pinus, poder calorífico superior a 21,90 MJ.kg<sup>-1</sup>. O *pellet* de mistura também apresentou o maior poder calorífico útil (19,54 MJ.kg<sup>-1</sup>), devido sua alta densidade a granel e seu alto poder calorífico superior, obtendo ganho de 12,28%. O aumento do poder calorífico com a torrefação está relacionado à perda de oxigênio e hidrogênio e conservação de carbono, havendo assim, retenção de sólidos na biomassa e remoção dos componentes gasosos e líquidos (VAN DER STELT et al., 2011).

A figura 26 apresenta os valores médios do Teor de carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio de *pellets* torrados.

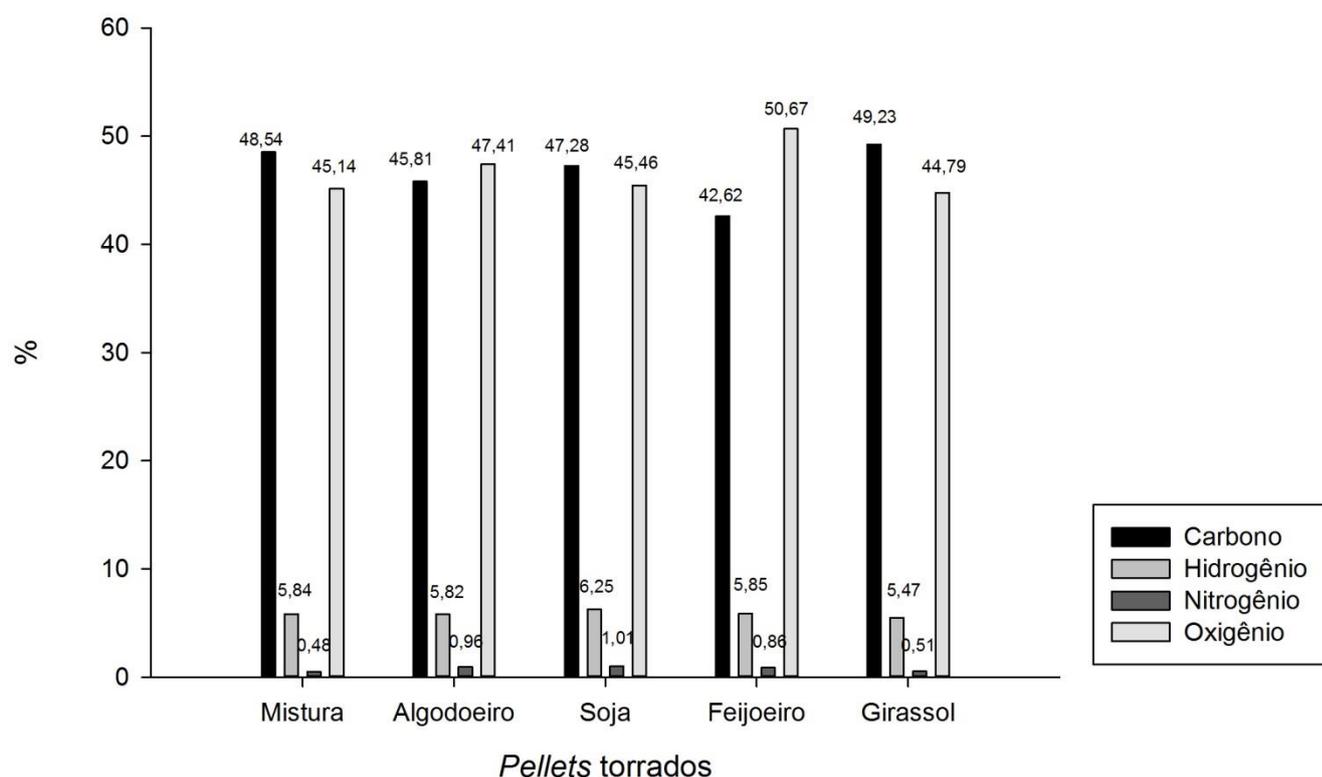


Figura 26. Teor de carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio de pellets torrados. Mistura: girassol/ maravalha de pinus.

Observa-se que os teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio dos *pellets* torrados do girassol apresentou o maior valor para carbono elementar (49,23%), seguido de mistura girassol/pinus (48,53%) e o de soja (45,46%), devido ao processo de torrefação que permitiu armazenar maior quantidade de carbono.

O maior teor de hidrogênio foi o apresentado pela soja de 6,25% e a torrefação contribuiu para aumento deste componente em 4,89%. Por outro lado, os *pellets* torrados da mistura, do algodoeiro e do girassol tiveram redução. Ferro et al., (2009) observaram que *pellets* de palha de trigo apresentaram aumento de carbono e redução de hidrogênio durante a torrefação a 250°C com 1 hora de tempo de residência, diferentemente do encontrado para o *pellet* de soja neste estudo. No processo de torrefação, o hidrogênio elementar é reduzido e o carbono elementar aumenta acentuadamente (CHEN et al., 2015), e ocorre a diminuição do conteúdo de oxigênio devido à decomposição de grupos carboidratos, carbonila e hidroxila nas biomassas (CHEN et al., 2014).

A figura 27 apresenta os valores médios da Densidade energética a granel e sólida de *pellets* torrados.

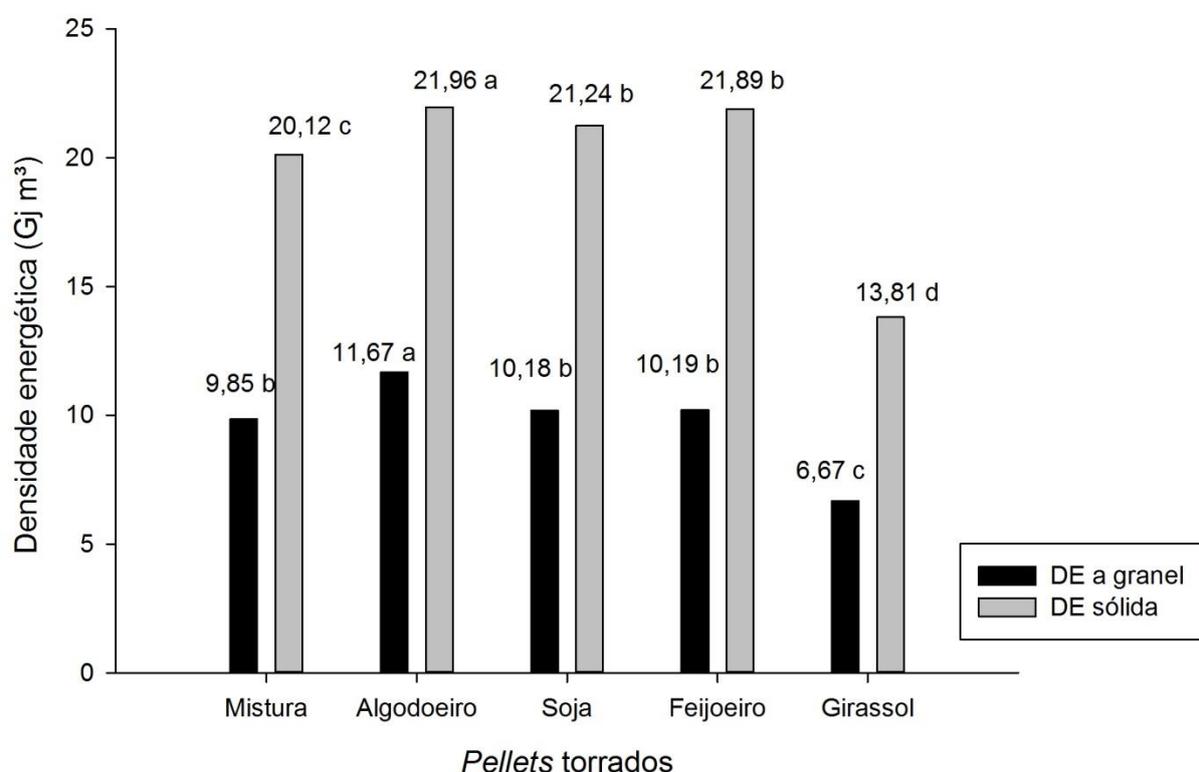


Figura 27. Densidade energética a granel e sólida de pellets torrados. Obs: Médias seguidas da mesma letra, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p > 0,05$ ). Mistura: girassol/ maravalha de pinus.

O *pellet* torrado de algodão apresentou a melhor densidade energética a granel ( $11,67 \text{ GJ.m}^{-3}$ ), devido a alta densidade a granel destes *pellets* ( $615 \text{ kg.m}^{-3}$ ), apresentando ganho de 12% pelo processo de torrefação. Valores semelhantes ( $11,26 \text{ GJ.m}^{-3}$ ) foram encontrados para *pellets* torrados de bagaço de cana a  $240^\circ\text{C}$  por 15 minutos de tempo de residência (PEREIRA, 2014). O *pellet* torrado de algodão também apresentou melhor densidade energética sólida ( $21,96 \text{ GJ.m}^{-3}$ ) com ganho de 6%. A torrefação permite melhorar o uso de energia, reduzir os custos logísticos e facilitar o manuseio (NUNES et al., 2014; USLU et al., 2008; MOBINI et al., 2014). A densidade energética é aprimorada pela torrefação, influenciado pela duração desta que leva ao aumento do teor de carbono e a intensidade energética (FELFRI et al., 2005). O alto conteúdo de energia por unidade de massa de biomassa torrada, a torna muito atraente para aplicações de combustão e gaseificação (PROSKURINA et al., 2017).

#### 6.4. COMPORTAMENTO DOS RESÍDUOS FRENTE AO PROCESSO DE PELETIZAÇÃO E DE TORREFAÇÃO

Na tabela 11 estão presentes os valores percentuais de modificação nas características dos resíduos quando transformados em *pellet* não torrado e *pellet* torrado em comparação ao resíduo na condição *in natura*.

Tabela 11. Modificações nas características dos resíduos quando peletizados.

Características	<i>Pellets</i>	Resíduos agroflorestais (%)				
		Mistura	Algodoeiro	Soja	Feijoeiro	Girassol
Umidade	Não torrados	-15	-31	-29	-28	-14
	Torrados	-59	-73	-75	-77	-70
Densidade do granel	Não torrados	+149	+305	+145	+231	+70

	Torrados	+118	+291	+133	+201	+27
Poder calorífico útil	Não torrados	+2	+4	+4	+4	+2
	Torrados	+16	+21	+18	+19	+33
Densidade energética	Não torrados	+155	+325	+156	+245	+74
	Torrados	+153	+376	+178	+260	+69

Obs: (-) corresponde a redução dos valores das características avaliadas; (+) corresponde a aumento dos valores das características avaliadas; Mistura: girassol/ maravalha de pinus.

Observa-se uma perda de umidade em maior escala dos pellets torrados, destaque para os *pellets* torrados de algodoeiro, feijoeiro e soja, proporcionado pelo processo de torrefação, em que os grupos de hidroxila são parcialmente destruídos por desidratação (YAN et al., 2009), tornando a biomassa torrada hidrofóbica (BATIDZIRAI et al., 2013). Conforme observado por Garcia et al. (2018), *pellets* de pinus torrados foram superiores estaticamente aos *pellets* de pinus não torrados, apresentando teores de 2,75% e 7,62% de umidade, respectivamente. Conforme nosso estudo, *pellets* não torrados apresentaram umidades de 8,45% a 11,20% e após a torrefação a 250°C por 30 min apresentaram perda de umidade atingindo teores de 2,32% a 3,67%.

O teor de umidade interfere na capacidade de ignição da biomassa e no poder calorífico útil, pois durante a combustão parte da energia do combustível é utilizada na evaporação da água, diminuindo a energia disponível da biomassa (QUIRINO et al., 2012).

A peletização é um processo de adensamento que pode ser comprovado pelos resultados apresentados, onde se observa aumentos acima de 100% para a densidade do granel, com exceção do resíduo de girassol, que ficou em torno de 70% para o *pellet* não torrado e 27% para o *pellet* torrado, mas atingindo 300% para o *pellet* de algodoeiro. Observa-se um menor ganho em densidade do granel para o *pellet* torrado, uma vez que no processo de torreficação há uma perda em densidade aparente, devido principalmente à degradação das hemiceluloses (NHUCHHEN et al., 2014). Conforme nosso estudo, *pellets* não torrados apresentaram densidades de 470 kg.m<sup>-3</sup> a 636 kg.m<sup>-3</sup> após a torrefação a 250°C por 30 min apresentaram perda de densidades atingindo valores de 353 kg.m<sup>-3</sup> a 615 kg.m<sup>-3</sup>.

Quanto a propriedade de densidade a granel há um destaque para os *pellets* não torrado de algodoeiro e feijoeiro. O processo de compactação dos *pellets* através do atrito entre as partículas e a matriz peletizadora e o aquecimento gerado, promove a elevação da densidade e

diminuição do teor de umidade e consequentemente aumento da densidade energética do produto gerado (NONES et al., 2017). Na torrefação, conforme a temperatura aumenta, a densidade dos *pellets* diminui, sendo inferiores aos de *pellets* não torrados (STELTE et al., 2011a). Protásio et al.(2015) encontraram perda de 32% em densidade a granel para *pellets* de pinus torrados a 250°C por 30 minutos com taxa de aquecimento de 1,67°C min<sup>-1</sup>, enquanto neste estudo constatou-se perda de 3% a 14% de densidade a granel.

Os maiores ganhos nos valores de poder calorífico útil e na densidade energética são observados para os *pellets* torrados, devido a uma maior concentração de carbono presente na amostra, a biomassa torrada aumenta seu poder calorífico (KEIPI et al., 2014).

Quanto a propriedade de poder calorífico útil há um destaque no *pellet* torrado de mistura pinus/girassol. O qual é elevado em função da degradação de compostos menos energéticos no processo de torrefação e aumento relativo do teor de lignina oriundo da degradação destes outros compostos (NHUCHHEN et al., 2014). Para os poderes caloríficos superiores, Garcia et al. (2018) encontraram valores superiores para os *pellets* torrados de pinus, obtendo valores de 22,94 MJ.kg<sup>-1</sup> e 20,65 MJ.kg<sup>-1</sup> para os *pellets* não torrados. Conforme nosso estudo, *pellets* não torrados apresentaram poder calorífico útil de 14,55 MJ.kg<sup>-1</sup> a 17,14 MJ.kg<sup>-1</sup> e após a torrefação a 250°C por 30 min apresentaram ganho em poder calorífico útil atingindo teores de 18,08 MJ.kg<sup>-1</sup> a 19,54 MJ.kg<sup>-1</sup>

Quanto a propriedade de densidade energética há um destaque no *pellet* torrado de algodoeiro. Propriedade elevada em função do acréscimo na densidade a granel e poder calorífico superior e redução da umidade de equilíbrio higroscópico (MAGALHÃES et al., 2017). A combinação de processos de torrefação e peletização resultam em *pellets* densos em energia com alto poder calorífico, com natureza hidrofóbica e melhores características de moagem (MEDIC et al., 2012). Conforme Garcia et al. (2018), *pellets* torrados foram superiores estatisticamente que *pellets* não torrados, como encontrado para *pellets* torrados de pinus com densidade energética de 15,69 GJ.m<sup>-3</sup>, enquanto *pellets* não torrados tem teores de 14,25 GJ.m<sup>-3</sup>. Conforme nosso estudo, *pellets* não torrados apresentaram densidade energética de 6,84 GJ.m<sup>-3</sup> a 10,42 GJ.m<sup>-3</sup> e após a torrefação a 250°C por 30 min apresentaram ganho em densidade energética atingindo teores de 6,67 GJ.m<sup>-3</sup> a 11,67 GJ.m<sup>-3</sup>.

## CONCLUSÃO GERAL

Os resíduos de girassol, mistura girassol/pinus e soja apresentaram características físicas e energéticas atrativas para uso energético sem transformação, com o girassol apresentando maior densidade a granel e conseqüentemente maior densidade energética e a mistura apresentando menor teor de umidade e maior poder calorífico útil, enquanto a soja apresentou maior densidade energética. Misturar diferentes tipos de biomassa permite melhorias nas propriedades de teores de cinzas e poder calorífico destes, como foi verificado o da mistura deste estudo.

Na finalidade de caracterização dos resíduos para transformação em pellets, os resíduos de algodoeiro e soja apresentaram características químicas mais atrativas como alto teor de lignina, quanto às energéticas, a soja apresentou maior poder calorífico entre os resíduos e maior densidade energética, quanto às características físicas o algodão apresentou maior teor de partículas de classe granulométrica a 20 mesh (0,841mm), favorecendo a formação do *pellet*. Dessa forma, os resíduos agroflorestais apresentam potencial para uso em processos de adensamento por peletização.

De acordo com os padrões para os *pellets* estabelecidos na norma ISO 17225 parte 6, conclui-se que os *pellets* de algodoeiro e feijoeiro classificados na norma como não-lenhosos, são recomendados para uso industrial e doméstico e têm classificação A. O resíduo de algodoeiro devido a suas características físicas, alcançou maior ganho com o processo de peletização.

Os pellets de algodoeiro alcançaram maior ganho com o processo de torrefação, sendo superior aos demais. A torrefação a 250°C por 30 minutos e taxa de aquecimento de 5°C min<sup>-1</sup> favoreceu o aumento do poder calorífico, densidade energética e redução da umidade dos pellets e o tratamento mecânico através da peletização gerou ganhos em densidade a granel.

Dessa forma, é tecnicamente viável a utilização dos resíduos agroflorestais como biocombustível sólido na forma de *pellet* não torrado e torrado, visando a geração de subprodutos energéticos de alto valor agregado. Sendo necessários estudos que avaliem se é viável economicamente a utilização dos resíduos agroflorestais como biocombustível sólido na forma de *pellet* não torrado e torrado.

## REFERÊNCIAS

ACHARYA, B.; DUTTA, A.; MINARET, J. Review on comparative study of dry and wet torrefaction. **Sustain Energy Technol Assess**, v.12, p.26–37.2015.

ADHIKAR, B.B.; CHAE, M.; ZHU, C.; KHAN, A.; HARFIELD, D.; CHOI, P.; BRESSLER, D.C. Pelletization of Torrefied Wood Using a Proteinaceous Binder Developed from Hydrolyzed Specified Risk Materials. **Processes**, v.7, p.229.2019.

AGUIAR, A. V.; SOUSA, V. A.; SHIMIZU, J. Y. Cultivo de Pinus. Sistemas de Produção: Embrapa Florestas -2ª edição, v. 5, p.15-25, maio 2011.

ALAKANGAS, E.; JUNGINGER, M.; VAN DAM, J.; HINGE, J.; KERÄNEN, J.; OLSSON, O. et al., EUBIONET III- solutions to biomass trade and market barriers, *Renew. Sust. Energ Rev.* v.16, p.4277 e 4290.2012.

ALMEIDA, G.; BRITO, J.O.; PERRÉ, P. Alterations in energy properties of eucalyptus wood and bark subjected to torrefaction: the potential of mass loss as a synthetic indicator. **Bioresour Technol**, v.101,p.9778–9784.2010.

AMABLE, R.F.; FERNANDES, F.D.; SANZONOWICZ, C. Girassol como alternativa para sistema de produção do cerrado. Circular técnica 20. EMBRAPA CERRADOS. 2002.

ARRANZ, J. I.; MIRANDA, M.T.; MONTERO, I.; SEPÚVEDA, F.J.; ROJAS, C.V. Characterization and combustion behaviour of commercial and experimental wood pellets in South West Europe. **Fuel**, v. 142, p. 199-207, 2015.

ASABE Standards, S 269.4. Cubes, Pellets, and Crumbles – Definitions and Methods for Determining Density, Durability, and Moisture Content, ASABE, St. Joseph, MI, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE INDÚSTRIAS DA BIOMASSA – ABIB. Inventário residual Brasil. 2011. Disponível em: <<http://pt.calameo.com/accounts/200968>>. Acesso em: 01 de setembro de 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR NM 248: Agregados – determinação da composição granulométrica. 6p. 2003.

BACH, Q.; SKREIBERG, Ø. Upgrading biomass fuels via wet torrefaction: a review and comparison with dry torrefaction. **Renew Sustain Energy Rev**, v.54, p.665–77.2016.

BAJWA, D. S.; PETERSON, T.; SHARMA, N.; SHOJAEIARANI, J.; BAJWA, S. G. A review of densified solid biomass for energy production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 96, p. 296-305, 2018.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL – BEN. 2021: Ano base 2020 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2021. 292 p. : 182 ill. : 23 cm

BARBANERA, M.; LASCARO, E.; STANZIONE, V.; ESPOSITO, A.; ALTIERI, R.; BUFACCHI, M. Characterization of pellets from mixing olive pomace and olive tree Pruning. **Renewable Energy** v.88, p.185 e 191.2016.

BATIDZIRAI, B.; VAN DER HILST, F.; MEERMAN, H.; JUNGINGER, M.H.; FAAIJ, A.P.C. Optimization potential of biomass supply chains with torrefaction technology, **Biofuel Bioprod. Bioref**, v.8(2), p.253 e 282.2013.

BEEKES, M. Advantages and drawbacks for international trade of torrefied products. In: 4th Central European Biomass Conference, January 2014.

BERGSTRÖM, D.; ISRAELSSON, S.; ÖHMAN, M.; DAHLQVIST, S.A.; GREF, R., BOMAN, C.; WÄSTERLUND, I. Effects of raw material particle size distribution on the characteristics of Scots pine sawdust fuel pellets, **Fuel Process. Technol.** v. 89, p.1324–1329.2008.

BUFALINO, L.; MENDES, L. M.; TONOLI, G. H. D.; SCATOLINO, M. V.; SILVA, J. R. M.; MORI, F. A. Relation of transverse air permeability with physical properties in different compositions of sugarcane bagasse particleboards. **Materials Research**, São Carlos, v. 16, n. 1, p. 150-157, 2013.

CAO, L.; YUAN, X.; LI, H.; LI, C.; XIAO, Z.; JIANG, L.; HUANG, B.; XIAO, Z.; CHEN, X.; WANG, H.; ZENG, G. Complementary effects of torrefaction and co-pelletization: Energy consumption and characteristics of pellets, **Bioresour. Technol.** v. 185 p. 254–262. 2015.

CARROLL, J. P.; FINNAN, J. Physical and chemical properties of pellets from energy crops and cereal straws. **Biosystems Engineering**, v. 112, n. 2, p. 151-159, 2012.

CASTELLANO, J.M.; GÓMEZ, M.; FERNÁNDEZ, M.; ESTEBAN, L.S.; CARRASCO, J.E. Study on the effects of raw materials composition and pelletization conditions on the quality and properties of pellets obtained from different woody and non woody biomasses, **Fuel**, v.139, p.629–636.2015.

CHEN, W.H.; KUO, P.C. Torrefaction and co-torrefaction characterization of hemicellulose, cellulose and lignin as well as torrefaction of some basic constituents in biomass. **Energy**, v.36,p.803–811.2011.

CHEN, W-H.; PENG, J.; BI, X.T. A state-of-the art review of biomass torrefaction, densification and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.44, p.847–866.2015.

CHEN, Y.; YANG, H.; YANG, Q.; HAO, H.; ZHU, B.; CHEN, H. Torrefaction of agriculture straws and its application on biomass materials pyrolysis polygeneration. **Bioresour. Technol.** v..156, p.70–77.2014.

CHEW, J.J.; DOSHI, V. Recent advances in biomass pretreatment–torrefaction fundamentals and technology. **Renew Sustain Energy Rev**, v.15,p.4212–4222.2011.

CHEW, K.W.; CHIA, S.R.; YAP Y.J.; LING, T.C.; TAO, Y.; SHOW, P.L. Densification of food waste compost: effects of moisture content and dairy powder waste additives on pellet quality. **Process Saf Environ Prot.**v. 116, p.780-786. 2018.

CHOI, L.; SUDIARTO, S.I.A.; RENGAMAN, A. Prediction of livestock manure and mixture higher heating value based on fundamental analysis, **Fuel**, v.116, p.772-780.2014.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. Acompanhamento da safra brasileira: grãos, v. 6 - safra 2018/19- n. 6 - sétimo levantamento, abril 2019.

CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.S.; GÓMEZ, E.O. **Biomassa para energia**. Editora Unicamp, 2ª ed., 2011. 734p.

COSTA, E.V.S.; PEREIRA, M.P.de.C.F.; DA SILVA, C.M.S.; PEREIRA, B.L.C.; ROCHA, M.F.V.; CARNEIRO, A. de. C.O. Torrefied briquettes of sugar cane bagasse and eucalyptus. *Revista Árvore*. v.43(1),430101.2019.

COYNER, B. Pres-to-Logs, A History Lesson in Industry Efficiency. *Timber West Magazine*, 2004.

DA SILVA, C.M.S.; CARNEIRO, A.DE.C.O.; VITALA, B.R.; FIGUERÓA, C.G.; FIALHO, L.F.; MAGALHÃES, M.A. Biomass torrefaction for energy purposes – Definitions and an overview of challenges and opportunities in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.82, p.2426–2432.2018.

DA SILVA, C.M.S.; CARNEIRO, A.DE.C.O.; PEREIRA, B.L.C.; VITAL, B.R.; ALVES, I.C.N.; MAGALHAES, M.A. Stability to thermal degradation and chemical composition of woody biomass subjected to the torrefaction process. **Eur J Wood Prod**, v.74, p.845–850.2016.

DIAS, J. M. C. D. S.; SOUZA, D. T. DE.; BRAGA, M.; ONOYAMA, M. M.; MIRANDA, C. H. B.; BARBOSA, P. F. D.; ROCHA, J. D. Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais. Embrapa Agroenergia, pp. 132, Brasília, 2012.

DUCA, D.; RIVA, G.; FOPPA PEDRETTI, E.; TOSCANO, G. Wood pellet quality with respect to EN 14961-2 standard and certifications. **Fuel**, v.135, p.9–14.2014.

DURÃES, F.O.M.; MAY, A.; PARELLA, R.A da C. **Sistema Agroindustrial do Sorgo Sacarino no Brasil e a Participação Público Privada: Oportunidades, Perspectivas e Desafios**. Documentos, Sete Lagoas-MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2012. 76p.

ESTEVES, B.M.; PEREIRA, H.M. Wood modification by heat treatment: a review. **Bio Resources**, v.4, p.370–404.2009.

FELFRI, F.F.; LUENGO, C.A.; SUAREZ, J.A.; BEATON, P.A. Wood briquete torrefaction. **Energy Sustain Dev**, v.9,p.19–22.2005.

FERNANDES, E. R. K.; MARANGONI, C.; SOUZA, O.; SELLIN, N. Thermochemical characterization of banana leaves as a potential energy source. **Energy conversion and management**, v. 75, p. 603-608. 2013.

FERRO, D.T.; SOLER, P.B.; ZANZI, R. Torrefacción de biomasa densificada **Tecnología Química**, vol. XXIX, pp. 180-186.2009.

FILBAKK, T.; JIRJIS, R.; NURMI, J.; HOIBO, O. The effect of bark content on quality parameters of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) pellets. **Biomass & Bioenergy**, v. 35, n. 8, p. 3342-3349, 2011.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAOSTAT. Crops. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>>. Acesso em: 24 de novembro de 2019.

FOOD AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAOSTAT. Forestry Production and Trade. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>. Acesso em : 30 de Março de 2022.

GARCIA, D. P. Pellets de Madeira. Trabalho de Graduação do Curso Engenharia Industrial Madeireira. Universidade Estadual Paulista. Itapeva, SP, 58 p.2008.

GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G. Caracterização energética de pellets de madeira. **Revista da Madeira**, v. 135, n. 2, p. 14-18, 2013.

GARCIA, D.P.; CARASCHI, J.C.; VENTORIM, G.; PRATES, G.A.; PROTASSIO, T.P.; Qualidade dos pellets de biomassas brasileiras para aquecimento residencial: padrões da norma ISO 17225. **Ciência da Madeira**, v.9, p. 45-53, 2018.

GARCIA, D.P.; CARASCHI, J.C.; VENTORIM, G.; VIEIRA, F.H.A.; PROTASSIO, T.de.P. Comparative energy properties of torrefied pellets in relation to pine and elephant grass pellets. **Bio Resources**, v.13 (2), p.2898-2906.2018.

GARCÍA, R.; GIL, M.V.; RUBIERA, F.; PEVIDA, C. Pelletization of wood and alternative residual biomass blends for producing industrial quality pellets, **Fuel** v.251, p.739 e 753.2019.

GARCÍA, R.; PIZARRO, C.; LAVÍN, A. G.; BUENO, J. L.: Biomass proximate analysis using thermogravimetry. **Bioresour. Technol.** v.139, p.1–4.2013.

GARCIA-MARAVAR, A.; RODRÍGUEZ, M.L.; SERRANO-BERNARDO, F.; DIAZ, F.; ZAMORANO, M. Factors affecting the quality of pellets made from residual biomass of olive trees, **Fuel Process Technol.** v.129, p.1 e 7.2015.

GAZZOLA, A.; FERREIRA, J.R.; C. T.G.; CUNHA, D. A.; BORTOLINI, E.; PAIAO, G.D.; PRIMIANO, I. V.; PESTANA, J.; D'ANDRÉA, M. S. C.; OLIVEIRA, M. S. A cultura do girassol. FEALQ, 2012, 69 p.

GOKCOL, C.; DURSUN, B.; ALBOYACI, B.; SUNAN, E. Importance of biomass energy as alternative to other sources in Turkey, **Energy Policy**, v.37, p.424 e 431.2009.

HU, Q.; YANG, H.; XU, H.; WU, Z.; LIM, C.J.; BI, X.T.; CHEN, H. Thermal behavior and reaction kinetics analysis of pyrolysis and subsequent in-situ gasification of torrefied biomass pellets. **Energy Conversion and Management**, v.161, p.205–214.2018.

HÜEBLIN. H. J. Modelo para a aplicação da metodologia Zeri. Sistema de aproveitamento integral da biomassa de árvores de reflorestamento. Curitiba. 2001. 139 f. Dissertação de mestrado. CEFET.PR.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ARVORE- IBÁ. São Paulo, SP: IBÁ, 2021.93 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO 17225-6 (2014)  
Solid biofuels — Fuel specifications and classes — Part 6: Graded non-woody pellets

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO 17828 (2015)  
Solid biofuels — Determination of bulk density

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO 18122 (2015)  
Solid biofuels — Determination of ash content

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO 18123 (2015)  
Solid biofuels — Determination of the content of volatile matter

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO 18125 (2017)  
Solid biofuels — Determination of calorific value

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO 18134-1 (2015)  
Solid biofuels — Determination of moisture content — Oven dry method — Part 1: Total moisture — Reference method

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO 18847 (2016)  
Solid biofuels — Determination of particle density of pellets and briquetes

INTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA. Diagnóstico dos Resíduos Orgânicos do Setor Agrossilvopastoril e Agroindústrias Associadas Relatório de Pesquisa. Brasília, 2012. Disponível em: <[http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120917\\_relatorio\\_res\\_iduos\\_organicos.pdf](http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120917_relatorio_res_iduos_organicos.pdf)>.

JACINTO, R.C.; BRAND, M.A.; CUNHA, A.B.; SOUZA, D.L.; SILVA, M.V. Utilização de resíduos da cadeia produtiva do pinhão para a produção de pellets para geração de energia. **Floresta**, v. 47, p. 353 - 363. 2017.

KALIYAN, N.; MOREY, R.V. Constitutive model for densification of corn stover and switchgrass, **Biosyst. Eng.** v. 104, p.47–63.2009.

KALIYAN, N.; MOREY, R.V. Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switchgrass, **Bioresour.Technol.** v.101, p.1082–1090.2010.

KEIPI, T.; TOLVANEN, H.; KOKKO, L.; RAIKO, R. The effect of torrefaction on the chlorine content and heating value of eight woody biomass samples. *Biomass Bioenergy*, 66:232–9.2014.

KHALSA, J.H.A.; LEISTNER, D.; WELLER, N.; DARVELL, L.I.; DOOLEY, B. Torrefied Biomass Pellets—Comparing Grindability in Different Laboratory Mills. **Energies**, v.9, p.794.2016.

KIM, Y-U.; NA, B-II.; AHN, B-J.; LEE, H-W.; LEE, J-W. Optimal condition of torrefaction for high energy density solid fuel of fast growing tree species. **Korean J. Chem. Eng.**, v.32 (8), p.1547-1553.2015.

KOPPEJAN, J.; SOKHANSANJ, S.; MELIN, S.; MADRALI, S. Status overview of torrefaction technologies; 2012. p. 54.

KRISTEN, C.; LENZ, V.; SCHRÖDER, H.W.; REPKE, J.U. Hay pellets - the influence of particle size reduction on their physical-mechanical quality and energy demand during production, **Fuel Process. Technol.** v.148, p.163–174.2016.

LAMERS, P.; SEARCY, E.; HESS, J.H.; STIVHNOTHE, H. Developing the Global Bioeconomy, Technical, Market, and Environmental Lessons from Bioenergy, Elsevier Inc, 2016.

LAVERGNE, S.; LARSSON, S.H.; PEREZ, D.DA.S.; MARCHAND, M.; CAMPARGUE, M.; DUPONT, C. Effect of process parameters and biomass composition on flat-die pellet production from underexploited forest and agricultural biomass. **Fuel** 302. 2021.

LEAVER, R. H. SECTION" A"-Definition of pellets and their use, 1970.

LEITE, E. R. S.; PROTÁSIO, T. P.; ROSADO, S. C. S.; TRUGILHO, P. F.; TONOLI, G. H. D.; BUFALINO, L. Avaliação da qualidade da madeira de Coffea arabica L. como fonte de bioenergia. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 4, p. 541-549, dez. 2014.

LI, H.; LIU, X.; LEGROS, R.; BI, X.T.; LIM, C.J., SOKHANSANJ, S. Torrefaction of sawdust in a fluidized bed reactor. **Bioresour Technol**, v.103, p.453–458.2012a.

LI, H.; LIU, X.; LEGROS, R.; BI, X.T.; LIM, C.J.; SOKHANSANJ, S. Pelletization of torrefied sawdust and properties of torrefied pellets, **Appl. Energy**, v.93, p.680 e 685.2012b.

LIU, Z.; FEI, B.; JIANG, Z.; CAI, Z.; LIU, X. Important properties of bamboo pellets to be used as commercial solid fuel in China. **Wood Sci Technol**. v.48, p. 903–917. 2014.

LIU, Z.; MI, B.; JIANG, Z.; FEI, B.; CAI, Z.; LIU, X. Improved bulk density of bamboo pellets as biomass for energy production. **Renewable Energy**, v.86, p.1 e 7.2016.

LIU, Z.; QUEK, A.; BALASUBRAMANIAM, R. Preparation and characterization of fuel pellets from woody biomass, agro-residues and their corresponding hydrochars. **Appl. Energy**, v.113, p.1315–1322.2014.

MAGALHÃES, M.A.; CARNEIRO, A.C.O.; DA SILVA, C.M.S.; VITAL, B.R.; MARTINS, M.A.; CÂNDIDO, W.L. Avaliação da torrefação da madeira em curtos tempos de residência em um reator tipo rosca sem fim. **Ciência da Madeira**, v.9(3), p.160-169.2018.

MATOS, A. T. Curso sobre tratamento de resíduos agroindustriais. [s.l.]:[s.n.], 2005.Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAYNoAL/tratamento-residuosagroindustriais>>.

MEDIC, D.; DARR, M.; SHAH, A.; POTTER, B.; ZIMMERMAN, J. Effect of Torrefaction Process Parameters on Biomass Feedstock Upgrading. **Fuel**, v.91.1,p.147–154.2012.

MIRANDA, T.; MONTEIRO, I.; SEPÚLVEDA, F.J.; ARRANZ, J.I.; ROJAS, C.V.; NOGALES, S. A Review of Pellets from Different Sources. **Materials**, v.8, p.1413-1427.2015.

MISLJENOVIC, N.; BACH, Q.V.; TRAN, K.Q.; SALAS-BRINGAS, C.; SKREIBERG, Ø. Torrefaction influence on pelletability and pellet quality of Norwegian forest residues, **Energy Fuels**, v. 28 (4), p.2554 e 2561.2014.

MOBINI, M.; MEYER, J.C.; TRIPPE, F.; SOWLATI, T.; FR€OHHLING, M.; SCHULTMANN, F. Assessing the integration of torrefaction into wood pellet production, **J. Clean. Prod.** v.78, p.216 e 225.2014.

MORAES, M. D. A.; SANTOS, J. H.; CONEGLIAN, A.; SIQUEIRA, B. L.; SOUSA JUNIOR, A. D.; CANTO, J. L.; SETTE JR, C.R. Bioenergia com resíduos do desdobro da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Revista de Ciências Agrárias (LISBOA)**, v. 42, p. 520-527, 2019.

NEVES, T. A.; PROTÁSIO, T de P.; TRUGILHO, P. T.; VALLE, M. L. A.; DE SOUSA, L. C.; VIEIRA, C. M. M.. Qualidade da madeira de clones de *Eucalyptus* em diferentes idades para a produção de bioenergia. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 56, n. 2, p. 139-148, 2013.

NHUCHHEN, D. R.; BASU, P.; ACHARYA, B. A Comprehensive Review on Biomass Torrefaction. **International Journal of Renewable Energy & Biofuels**, v. 2014, p. 56, 2014.

NHUCHHEN, D.R.; SALAM, P.A. Estimation of higher heating value of biomass from proximate analysis: A new approach. **Fuel** v.99, p.55–63.2012.

NOGUEIRA, L. U. H.; SILVA LORA, E. E. e TROSSERO, M. A. Dendroenergia: fundamentos e aplicações. Brasília: ANEEL, 2000, pp. 31-54.

NONES, D.L.; BRAND, M.A.; AMPESSAN, C.G.M.; FRIEDERICHS, G. Biomassa residual agrícola e florestal na produção de compactados para geração de energia. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v.16, n.2, p.155-164, 2017.

NUNES, L.J.R.; MATIAS, J.C.O.; CATALÃO, J.P.S. A review on torrefied biomass pellets as a sustainable alternative to coal in power generation, **Renew. Sustain. Energy Rev**, v.40, p.153 e 160.2014.

OBERNBERGER, I.; THEK, G. Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour, **Biomass Bioenergy**, v.27, p.653–669.2004.

OBERNBERGER, I.; THEK, G. *The Pellet Handbook e the Production and Thermal Utilisation of Biomass Pellets*, first ed., 2010. London, UK.

OHLIGER, A.; FORSTER, M.; KNEER, R. Torrefaction of beech wood: aparametric study including heat of reaction and grindability. **Fuel**, v.104, p.607–613.2013.

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

OLIVEIRA, M. Pellets: pequenos Notaveis, **Biomais** v.2, p.22-32.2015.

OLSSON, O.; HILLRING, B. The wood fuel market in Denmark– Price development, market efficiency and internationalization. **Energy**, v.78, p.141-148.2014.

PARK, S.; KIM, J.S.; OH, K.C.; CHO, L.H.; KIM, M.J.; JEONG, I.S.; LEE, C.G.; KIM, D.H. Characteristic Analysis of Torrefied Pellets: Determining Optimal Torrefaction Conditions for Agri-Byproduct. **Energies**,13:423.2020.

PĂRPĂRIȚĂ, E.; BREBU, M.; AZHAR UDDIN, M.; YANIK, J.; VASILE, C. Pyrolysis behaviors of various biomasses. **Polym Degrad Stab**, v.100,p.1–9.2014.

PAULA, L. E. R.; TRUGILHO, P.F.; REZENDE, R.N.; ASSIS, C.O.; BALIZA, A.E.R. Produção e avaliação de briquetes de resíduos lignocelulósicos. **Revista Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v.31, n. 66, p. 103-112, jun. 2011a.

PAULA, L.E.R., TRUGILHO, P.F., NAPOLI, A., BIANCHI, M.L.: Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **Cerne** v.17 (2), p.237–246.2011b.

PENG, J.H.; BI, X.T.; LIM, C.J.; SOKHANSANJ, S. Study on density, hardness, and moisture up take of torrefied wood pellets. **Energy Fuel**, v.27 (2), p.967–974.2013b.

PENG, J.H.; BI, X.T.; SOKHANSANJ, S.; LIM, C.J. Torrefaction and densification of different species of softwood residues. **Fuel**, v.111, p.411–421.2013a.

PEREIRA, B. L. C. **Propriedades de pellets: biomassas, aditivos e tratamento térmico**. 2014. 73f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, 2014.

PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A.C.O.; CARVALHO, A.M.M.L.; VITAL, B.R.; OLIVEIRA, A.C.; CANAL, W.D. Influência da adição de lignina kraft nas propriedades de pellets de eucalipto. **Floresta**, v. 46, n. 2, p. 235-242, 2016.

PHANPHANICH, M.; MANI, S. Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass, **Bioresour. Technol**, v.102, p.1246 e 1253.2011.

PIMCHUAI, A.; DUTTA, A.; BASU, P. Torrefaction of agricultural residue to enhance biomass combustibility. **Energy Fuels**, v.24, p.4638–45.2010.

PIRRAGLIA, A.; GONZALEZ, R.; SALONI, D.; DENIG, J. Technical and economic assessment for the production of torrefied ligno-cellulosic biomass pellets in the US. **Energy Convers Manage**, v.66, p.153–164.2013.

PODDAR, S.; KAMRUZZAMAN, M.; SUJAN, S.M.A.; HOSSAIN, M.; JAMAL, M.S.; GAFUR, M.A.; KHANAM, M. Effect of compression pressure on lignocellulosic biomass pellet to improve fuel properties: Higher heating value. **Fuel**, v.131, p.43–48.2014.

PRADHAN, P.; ARORA, A.; MAHAJANI, S.M. Pilot scale evaluation of fuel pellets production from garden waste biomass, **Energy Sustain. Dev.** v. 43, p.1–14.2018.

PRINS, M.J.; PTASINSKI, K.J.; JANSSEN, F.J.J.G. Torrefaction of wood Part1.Weight loss kinetics. **J Anal Appl Pyrolysis**, v.77,p.28–34.2006.

PROSKURINA, S.; HEINIMÖ, J.; SCHIPFER, F.; VALLILAINEN, E. Biomass for industrial applications: The role of torrefaction, **Renewable Energy**, v. 111, p.265 e 274.2017.

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

PROTÁSIO, T. de P.; ALVES, I.C.N.; TRUGILHO, P.F.; SILVA, V.O.; BALIZA, A.E.R. Compactação de biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 273-283, 2011.

PROTÁSIO, T. de P.; TRUGILHO, P.F.; SIQUEIRA, H.F.de.; MELO, I.C.N.A.de.; ANDRADE, C.R.; GUIMARÃES JUNIOR, J.B. Caracterização energética de pellets in natura e torrificados produzidos com madeira residual de Pinus. **Pesq. flor. bras.**, Colombo, v. 35, n. 84, p. 435-442. 2015.

QUIRINO, W. F.; PINHA, I. V. O.; MOREIRA, A. C. O.; SOUZA, F.; TOMAZELLO FILHO, M. Densitometria de raios x na análise da qualidade de briquetes de resíduos de madeira. **Scientia Forestalis**, v. 40, n. 96, p. 525-536, 2012.

RABAÇAL, M.; FERNANDES, U.; COSTA, M. Combustion and emission characteristics of a domestic boiler fired with pellets of pine, industrial wood wastes and peach stones. **Renewable Energy** 51 (2013) 220 e 226.

RANGEL, I.C.; SILVA, F.F.; SOUZA, C.L.M.; ERTHAL JUNIOR, M.; GRAVINA, G.A.; SHIMOYA, A. Normas e padrões para produção de biomassa compactada no mundo: em breve o Brasil terá a sua? **Acta Biomedica Brasiliensia**. v. 9. 2018.

SAID, N.; ABDEL DAIEM, M.M.; GARCÍA-MARAVÉ, A.; ZAMORANO, M. Influence of densification parameters on quality properties of rice straw pellets, **Fuel Process. Technol.** v. 138 p. 56–64. 2015.

SAIDUR, R.; ABDELAZIZ, E.A.; DEMIRBAS, A.; HOSSAIN, M.S.; MEKHILEF, S. A review on biomass as a fuel for boilers. **Renew Sustain Energy Rev**, v.15, p.2262–2289.2011.

SANTOS, G. L.; DANTAS, K.A.; BEZERRA, L.L.; ARRIEL, N.H.C.; LUCENA, A.M.A.; MAIA, J.M. Cultivo de girassol para apicultura, forragem e produção de óleo. Campina Grande: EDUEPB, 2014. 35p.

SARKAR, M.; KUMAR, A.; TUMULURU, J.S.; PATIL, K.N.; BELLMER, D.D. Gasification performance of switchgrass pretreated with torrefaction and densification. **Appl Energy**, v.127,p.194–201.2014.

SATPATHY, S.K.; TABIL, L.G.; MEDA, V.; NAIK, S.N.; PRASAD, R. Torrefaction of wheat and barley straw after microwave heating. **Fuel**, v.124, p.269–78.2014.

SCATOLINO, M.V.; CABRAL NETO, L.F.; PROTÁSIO, T.P.; CARNEIRO, A.C.O.; ANDRADE, C.R.; GUIMARÃES JÚNIOR, J.B.; MENDES, L.M. Options for Generation of Sustainable Energy: Production of Pellets Based on Combinations Between Lignocellulosic Biomasses, **Waste Biomass Valor**, v.9, p.479–489.2018.

SERMYAGINA, E.; SAARI, J.; KAIKKO, J.; VAKKILAINEN, E. Hydrothermal carbonization of coniferous biomass: effect of process parameters on mass and energy yields. **J Anal Appl Pyrolysis**, v.113, p.551–6.2015.

SHANG, L.; NIELSEN, N.P.K.; DAHL, J.; STELTE, W.; AHRENFELDT, J.; HOLM, J.K.; THOMSEN, T.; HENRIKSEN, U.B. Quality effects caused by torrefaction of pellets made from Scots pine. **Fuel Processing Technology**, v.101, p.23–28.2012.

SHANG, L.; NIELSEN, N.P.K.; DAHL, J.; STELTE, W.; AHRENFELDT, J.; HOLM, J.K.; THOMSEN, T.; HENRIKSEN, U.B. Quality effects caused by torrefaction of pellets made from Scots pine. **Fuel Processing Technology**, v.101, p.23–28.2012.

SHAW, MD.; KARUNAKARAN, C.; TABIL, L.G. Physicochemical characteristics of densified untreated and steam exploded poplar wood and wheat straw grinds, **Biosyst. Eng.** v.103, p.198–207.2019.

SILVA, A. G.; ROCHA, L. C.; CANNIATTI, B. S. G. Physico-chemical characterization, protein digestibility and antioxidant activity of comun bean (*Phaseolus vulgaris* L.). **Alimentos e Nutrição**, v. 20, n. 4, p. 591-598, 2009.

SILVA, A.G.; DOS SANTOS, T.A.; BANDEIRA, M.L.S. de. F.; DE OLIVEIRA, P.F. Estudo do processo de torrefação de resíduos de biomassas para fins energéticos. **RBCIAMB**, v.45, p.86-99.2017.

SILVA, J. N.; SOBRINHO, J. C.; SAIKI, E. T. Utilização de biomassa na secagem de produtos agrícolas via gaseificação com combustão adjacente dos gases produzidos. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 24, n. 2, p. 405-411, 2004.

SONG, X.; YANG, Y.; ZHANG, M.; ZHANG, K.; WANG, D. Ultrasonic pelleting of torrefied lignocellulosic biomass for bioenergy production. **Renewable Energy**, v.129, p.56 e 62.2018.

SOUZA, H.J.P.L.; ARANTES, M.D.C.; VIDAURRE, G.B.; ANDRADE, C.R.; CARNEIRO, A.C.O.; SOUZA, D.P.L.; PROTASIO, T.P. Pelletization of eucalyptus wood and coffee growing wastes: Strategies for biomass valorization and sustainable bioenergy production, **Renewable Energy**, v.149, p.128-140.2020.

SOUZA, M.M. DE.; VITAL, B.R.; BARBOSA, A.C.; CARNEIRO, A.DE.C.O. Produção e avaliação de pellets compostos por diferentes proporções de resíduos sólidos urbanos. **Nature and Conservation**, v. 13, p. 80-92, 2020.

SETTE JR, C.R; MORAES, M. D. A.; CONEGLIAN, A.; RIBEIRO, R. M.; HANSTED, A. L. S. ; YAMAJI, F. M. . Forest harvest byproducts: Use of waste as energy. **Waste Management**, v. 114, p. 196-201, 2020.

SPELTER, H.; TOTH, D. North American Wood Pellet Sector. United States Department of Agriculture, Madison, WI, USA.2009.

STAHL, M.; BERGHEL, J. Energy efficient pilot-scale production of wood fuel pellets made from a raw material mix including sawdust rapeseed cake. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdã, v.35, n.12, p.4849-4854, 2011.

STAHL, M.; BERGHEL, J. Energy efficient pilot-scale production of wood fuel pellets made from a raw material mix including sawdust rapeseed cake. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdã, v.35, n.12, p.4849-4854, 2011.

STELTE, W.; CLEMONS, C.; HOLM, J.K.; SANADI, A.R.; AHRENFELDT, J.; SHANG, L.; HENRIKSEN, U.B. Pelletizing properties of torrefied spruce, **Biomass Bioenergy**, v.35 (11), p.4690 e 4698.2011a.

STELTE, W.; HOLM, J.K.; SANADI, A.R.; BARSBERG, S.; AHRENFELDT, J.; HENRIKSEN, U.B. Fuel pellets from biomass: the importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions, **Fuel**. v.90, p.3285–3290.2011b.

STELTE, W.; SANADI, A. R.; SHANG, L.; HOLM, J. K.; AHRENFELDT, J.; HENRIKSEN, U. B. Recent developments in biomass pelletization - a review. **Bioresources**, v. 7, n. 3, p. 4451 - 4490, 2012.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY - TAPPI. T 204 om-88: solvent extractives of wood and pulp. Atlanta: Tappi Technology Park, 1996. v.1.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY - TAPPI. T 211 om-93: Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C/2 . Atlanta: Tappi Technology Park, 1993. v.1.

TEMPLETON, D.; EHRMAN, T. Determination of Acid-Insoluble Lignin in Biomass. National Renewable Energy Laboratory (NREL), 1-14, 1995.

TOSCANO, G.; RIVA, G.; FOPPA PEDRETTI, E.; CORINALDESI, F.; MENGARELLI, C.; DUCA, D. Investigation on wood pellet quality and relationship between ash content and the most important chemical elements. **Biomass & Bioenergy**, v. 56, p. 317-322. 2013.

TRAN, K-Q.; LUO, X.; SEISENBAEVA, G.; JIRJIS, R. Stump torrefaction for bioenergy application. **Appl Energy**, v.112, p.539–46.2013.

TUMULURU, J.S.; WRIGHT, C.T.; HESS, J.R.; KENNEY, K.L. A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application, **Biofuels Bioprod. Biorefin.** V. 5, p. 683–707. 2011

USLU, A.; FAAIJA, A.P.C.; BERGMAN, P.C.A. Pretreatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation, **Energy**, v.33, p.1206 e 1223.2008.

VALE, A. T. DO.; MIGUEL, E. P.; MOREIRA, A. C. DE. O.; LIMA, C. M.; ORELLANA, B. B. M, A.; FORTES, M. M.; OLIVEIRA, M. P. O.; GONÇALEZ, J. C.; MARTINS, I. S .

Artificial neural networks in predicting energy density of *Bambusa vulgaris* in Brazil. **African Journal of Agricultural Research**, v. 12, p. 856-862, 2017.

VALE, A. T.; GENTIL, L. V. Produção e uso energético de biomassa e resíduos agroflorestais. In: *Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro III*. Rio Branco: Suprema, p.195-241, 2008.

VALE, A. T.; MENDES, R. M.; AMORIM, M. R. S.; DANTAS, V. F. S. Potencial energético da biomassa e carvão vegetal do epicarpo e da torta de pinhão manso (*Jatropha curcas*). **Cerne**, v. 17, n. 2. 2011.

VAN DER STELT, M. J. C.; GERHAUSER, H.; KIEL, J. H. A.; PTASINSKI, K. J. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. **Biomass Bioenergy**, v.35, p.3748-3762. 2011.

VAN LOO, S.; KOPPEJAN, J. *The handbook of biomass combustion and co-firing*. 1st ed. London Sterling, pp.442.2008.

VERMA, V.K.; BRAM, S.; DELATTIN, F.; LAHA, P.; VANDENDAEL, I.; HUBIN, A.; DE RUYCK, J. Agro-pellets for domestic heating boilers: Standard laboratory and real life performance, **Applied Energy**, v.90, p.17–23.2012.

VIEIRA, A.C.; SOUZA, S.N.M.; BARICCATTI, R.A.; SIQUEIRA, J.A.C.; NOGUEIRA, C.E.C. Caracterização da casca de arroz para geração de energia. **Revista Varia Scientia Agrárias**, v. 3, n. 1, p. 51-57, 2013.

WILD, M.; HEKTOR, B.; HESS, J.R. Possible effects of torrefaction on biomass trade; 2016.

WILÉN, C.; SIPILÄ, K.; TUOMI, S.; HILTUNEN, I.; LINDFORS, C.; SIPILÄ, E. et al. Wood torrefaction – market prospects and integration with the forest and energy industry; p. 55.2014.

XIAO, Z.; YUAN, X.; JIANG, L.; CHEN, X.; LI, H.; ZENG, G.; LENG, L.; WANG, H.; HUANG, H. Energy recovery and secondary pollutant emission from the combustion of copelletized fuel from municipal sewage sludge and wood sawdust, **Energy**, v.91,p.441–450.2015.

YAN, W.; ACHARJEE, T.C.; CORONELLA, C.J.; VASQUEZ, V.R. Thermal pretreatment of lignocellulosic biomass. **Environ Prog Sustain Energy**, v.28, p.435–440.2009.

YANG, P.; ZHAO, S.; ZHANG, Q.; HU, J.; LIU, R.; HUANG, Z.; GAO, Y. Synergistic effect of the cotton stalk and high ash coal on gas production during co-pyrolysis/gasification. **Bioresource Technology** v.336, p.125-336.2021.

YILDIZ, S.; GEZER, E.D.; YILDIZ, U.C. Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat, **Build. Environ**, v.41 (12), p.1762 e1766.2006.

ZHANG, C.; HO, S-H.; CHEN, W-H.; XIE, Y.; LIU, Z.; CHANG, J-S. Torrefaction performance and energy usage of biomass wastes and their correlations with torrefaction severity index. **Appl Energy**, v.220, p.598–604.2018.

ZUWAŁA, J. Life cycle approach for energy and environmental analysis of biomass and coal co-firing in CHP plant with backpressure turbine, **J. Clean. Prod.** v.35, p.164 e 175.2012.

MORAES, M. D. A.; SANTOS, J. H.; CONEGLIAN, A.; SIQUEIRA, B. L.; SOUSA JUNIOR, A. D.; CANTO, J. L.; SETTE JR, C.R. Bioenergia com resíduos do desdobro da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Revista de Ciências Agrárias (LISBOA)**, v. 42, p. 520-527, 2019.