

Análise dos parâmetros físicos, químicos e energéticos para produção de pellets a partir de biomassa residual

Silvia Maccari Petricoski¹, Mônica Sarolli Silva de Mendonça Costa¹, Adriana Ferla de Oliveira¹

¹ Programa de Pós Graduação em Engenharia e Tecnologia Ambiental – UFPR/UNIOESTE, Cascavel, Paraná.

* silvia.maccari31@gmail.com

Resumo: O pellet é considerado um biocombustível sólido, produzido a partir da compactação de resíduos lignocelulósicos utilizado para a geração de energia. A torrefação e a carbonização são processos de pirólise que podem ser alternativas para melhorar sua qualidade energética e comercialização. O objetivo deste trabalho, portanto, foi realizar uma análise dos parâmetros físicos, químicos e energéticos de Resíduos do Lodo de Estação de Tratamento de Efluentes do Abate de Suínos, Processamento de Milho, Serragem de Pinus e Capim Elefante BRS Capiáçu, comumente encontrados na Região Oeste do Estado do Paraná a fim de determinar suas características para fins de peletização como alternativa de utilização destes resíduos para geração de energia renovável com valor agregado e consequentemente redução dos impactos ambientais. Os materiais foram coletados, secados e armazenados no período de fevereiro à abril de 2023. Foram realizadas as análises de teor de umidade, perfil granulométrico, análise imediata e poder calorífico superior. Os resultados apresentados nas análises são favoráveis ao reaproveitamento do Lodo de Estação de Tratamento de Efluentes do Abate de Suínos, Processamento de Milho, Serragem de Pinus e Capim Elefante BRS Capiáçu para a produção de pellets.

Palavras-chave: Biocombustível; Bioenergia; Carbonização; Torrefação.

Analysis of physical, chemical and energetic parameters for the production of pellets from residual biomass

Abstract: The pellet is considered a solid biofuel, produced from the compaction of lignocellulosic waste used to generate energy. Roasting and carbonization are pyrolysis processes that can be alternatives to improve energy quality and commercialization. The objective of this work, therefore, was to carry out an analysis of the physical, chemical and energetic parameters of Waste Sludge from the Effluent Treatment Station for Swine Slaughtering, Corn Processing, Pine Sawdust and Elephant Grass BRS Capiáçu, commonly found in the Region West of the State of Paraná in order to determine its characteristics for pelletizing purposes as an alternative for using this waste to generate renewable energy with added value and consequently reducing environmental impacts. The materials were collected, dried and stored from February to April 2023. Moisture content, particle size profile, immediate analysis and higher calorific value analyzes were carried out. The results presented in the analyzes are favorable to the reuse of Sludge from the Swine Slaughter Effluent Treatment Station, Corn Processing, Pine Sawdust and Elefante Grass BRS Capiáçu for the production of pellets.

Keywords: Biofuel; Bioenergy; Carbonization; Roasting.

Introdução

Ao longo da história, diversas foram as fontes e as formas de energia utilizadas para a produção de bens e de serviços, em especial, a energia gerada a partir de combustíveis fósseis, como o petróleo. Em função dos limites de suas reservas mundiais, as emissões de CO₂, e os desastres ecológicos a partir da perfuração de poços de petróleo, é fundamental pensar em fontes de energia renováveis e sustentáveis: aquelas que se reconstituem naturalmente, em um curto período de tempo (SCHUTZ, MASSUQUETTI e ALVES, 2013; VIEIRA *et al.*, 2013).

Como solução para as preocupações com o meio ambiente e para a segurança no fornecimento energético, as energias renováveis ganham cada vez mais destaque. Além disso, a existência da relação entre energia e ambiente, com foco no desenvolvimento da humanidade, tem como consequência a demanda por alternativas ao atual modelo energético, a qual abrange a utilização de tecnologias eficientes, com ênfase no emprego de fontes renováveis (BRIDGWATER, 2006).

Nesse sentido, a biomassa tem adquirido grande importância, devido a ser a única fonte renovável a fornecer carbono fixo, que é um componente essencial para atendimento a muitos requisitos de combustíveis. A biomassa energética envolve todos os materiais que podem ser aplicados para fins energéticos (BRIDGWATER, 2006). Na matriz energética mundial, em 2019, a biomassa correspondia por 9,3 % (INSTITUTO DE ECONOMIA, 2020). Em 2020, de acordo com o Balanço Energético Nacional de 2021, 28 % da matriz energética brasileira era representada pela biomassa (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2021).

A biomassa *in natura*, no entanto, apresenta alguns inconvenientes quanto ao seu uso na geração de energia, incluindo baixa densidade, baixo poder calorífico e alto teor de umidade. Processos como a densificação e a pirólise, podem ser usados para melhorar essas características indesejáveis, aumentando a competitividade contra os combustíveis fósseis (WANG *et al.*, 2013).

Os biocombustíveis sólidos são combustíveis de origem vegetal, que se encontram no estado sólido em temperatura e pressão ambiente, como vantagens eles apresentam elevado poder calorífico, redução da emissão de gases de efeito estufa e redução da dependência energética. Os principais tipos de biocombustíveis sólidos utilizados são os pellets e briquetes de madeira (TUMULURU *et al.*, 2011).

A briquetagem e a peletização são os principais e mais comuns métodos de densificação da biomassa, no qual, o principal objetivo da realização desse processo é aumentar a densidade

energética da biomassa, resultando em vantagens como redução do gasto em transporte e espaço necessário para armazenamento, juntamente com a uniformidade na alimentação de equipamentos de conversão (TUMULURU *et al.*, 2011). Ambas as rotas possuem os mesmos materiais de processo e estágios de produção, entretanto os produtos se diferenciam no tamanho da biomassa densificada, cujo, geralmente o produto com menor diâmetro é definido como pellet e o com maior diâmetro é definido como briquete (MUAZU, BORRION, e STEGEMANN, 2017).

As numerosas vantagens da torrefação e carbonização podem aumentar a participação do Brasil no mercado de pellets, para tanto, é necessário determinar o comportamento de suas propriedades químicas, bem como, determinar seu potencial como biocombustível na geração de energia térmica (MAGALHÃES *et al.*, 2018). A torrefação e a carbonização são processos de pirólise, que podem ser alternativas para melhorar a qualidade e comercialização dos pellets, uma vez que tratamentos térmicos da biomassa resultam em aumento da densidade energética e diminuição da umidade. A torrefação consiste em tratar termicamente a biomassa entre 225 e 300 °C, em atmosfera inerte ou não oxidante, principalmente para que ocorra a degradação das hemiceluloses, responsáveis, em grande parte, pela absorção de água (PRINS, PTASINSKI e JANSSEN, 2006).

Já na carbonização, ocorre degradação térmica da biomassa, na ausência ou presença controlada de oxigênio, geralmente entre as temperaturas de 350 e 600 °C, embora possa ser realizada considerando-se temperaturas superiores (DEMIRBAS, 2009; PROTÁSIO *et al.*, 2012). Os produtos obtidos por esses processos são: sólido (carvão vegetal), líquido (bio-óleo) e gases combustíveis (KIMURA, 2009).

O setor agroindustrial brasileiro tem ampliado sua produtividade para atender as elevadas e crescentes taxas da demanda populacional por alimentos. Com isso, aumentam-se também as gerações de resíduos, em estado sólido, efluentes líquidos e materiais presentes nas emissões atmosféricas. Esses resíduos, principalmente quando não tratados de forma adequada, causam sérios impactos ambientais (MARTINEZ e FEIDEN, 2017).

Essa busca cada vez maior pela mitigação dos impactos ambientais, causado pela grande geração de resíduos, e a procura por alternativas de matéria-prima como fonte de energia, é uma motivação para o aumento do uso de materiais lignocelulósicos e resíduos agroindustriais para produção de biocombustíveis sólidos (SILVA *et al.*, 2018).

Neste contexto, o presente trabalho teve por objetivo realizar uma análise dos parâmetros físicos, químicos e energéticos de Resíduos do Lodo de Estação de Tratamento de Efluentes do

Abate de Suínos, Processamento de Milho, Serragem de pinus e Capim Elefante BRS Capiaçú comumente encontrados na Região Oeste do Estado do Paraná, sendo a produção de pellets uma alternativa de utilização destes resíduos para geração de energia renovável com valor agregado e consequentemente redução dos impactos ambientais.

Material e Métodos

Coleta e seleção dos materiais

Os materiais foram coletados, secados e armazenados no período de fevereiro à abril de 2023. A coleta do resíduo de processamento da fibra do milho, foi realizada na Empresa Totalmix Indústria e Comércio Ltda instalada no Município de Missal – PR.

O lodo de biodigestor da estação de tratamento de efluentes do abate de suínos foi coletado na empresa Frimesa instalada no Município de Medianeira – PR, colocado em balde de plástico com tampa.

O capim elefante BRS Capiaçú (*Pennisetum purpureum* Schum), foi coletado após seis meses do seu plantio em uma propriedade rural no município de Palotina, na região Oeste no Estado do Paraná.

A serragem de pinus foi coletada na empresa HMBio Energias Renováveis no Município de Toledo – PR. Todos os materiais foram transportados para o Laboratório de Química Orgânica e de Controle de Qualidade da UFPR – setor Palotina, onde foram realizadas as análises.

Secagem e acondicionamento dos materiais

A fibra de milho e a serragem de pinus não necessitaram de secagem uma vez que foram fornecidas secas e embaladas em sacos plásticos de 20 kg.

O capim elefante BRS Capiaçú, foi cortado a aproximadamente 10 cm do solo e moído em uma forrageira, marca Nogueira, modelo EM-4 com acionamento por motor elétrico de 10 cv. Em seguida foi colocado em uma lona e seco a sombra com temperaturas variando de 25 a 30 °C pelo período de 7 d (Figura 1). Após, foi seco em estufa à 80 °C por aproximadamente 24 h, foi moído novamente em forrageira, de marca Tramontina, de modelo TRF25, de motor 2 hp e saída lateral, com peneira de abertura 3 mm, na intenção de obter menores partículas (Figura 2). O armazenamento foi feito em sacos de ráfia e guardados em local seco e coberto.

Figura 1 – Secagem do Capim Elefante BRS Capiaçú.



Fonte: A autora (2023).

Figura 2 - Forrageira utilizada para obtenção de menor granulometria do material.



Fonte: A autora (2023).

O lodo do biodigestor passou por uma prensa desaguadora durante o processo de tratamento a qual já retira grande parte da água. O lodo foi submetido a secagem em estufa à 105 °C por aproximadamente 42 h (Figura 3) e armazenado em sacos plásticos.

Figura 3 - – Lodo seco após 42 h de Estufa.



Fonte: A autora (2023).

Determinação do teor de umidade no momento da coleta

Para determinação do teor de umidade das amostras, seguiu-se a norma NBR 14929 (ASSOCIAÇÃO BRASIEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2017). Este método por secagem em estufa consiste na determinação do teor de umidade através da diferença de massa das amostras, antes e depois de passarem por um processo de secagem em estufa a 103 ± 2 °C até massa constante.

Perfil Granulométrico

O perfil granulométrico foi realizado segundo adaptação da norma NBR 7402 (ASSOCIAÇÃO BRASIEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1982). Pesou-se aproximadamente 100 g de cada amostra e classificou-se em peneiras com abertura de 20 mesh (0,871 mm), 35 mesh (0,50 mm), 45 mesh (0,354 mm), 70 mesh (0,21 mm), 80 mesh (0,177

mm), com agitação manual por aproximadamente 15 min., conforme pode ser observado na Figura 4. Posteriormente as amostras foram retiradas de cada peneira e pesadas.

Figura 4 - Conjunto de peneiras para caracterização granulométrica. Fonte: A autora (2023).



Análise imediata

Na análise imediata foram determinados os teores de umidade (W), materiais voláteis (TV), carbono fixo (TC) e cinzas (CZ), realizados conforme as normas (Tabela 1) para carvões e madeiras. Todas as análises foram executadas em triplicata:

Tabela 1 – Tipos de análises e normas.

Análise	Norma
Umidade	AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM E-871-82 (2006)
Voláteis	AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM D-872-82 (2006)
Cinzas	AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM D-1102-84 (2007)
Carbono Fixo	AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM E-870-82 (2006)

Fonte: A autora (2023).

Teor de umidade

Os cadinhos e suas tampas foram calcinados em mufla a 750 °C por 3 h e, em seguida, colocados em dessecador até seu resfriamento e pesados. Posteriormente, foi adicionada aproximadamente 1 g de amostra e realizou-se a pesagem novamente. Os cadinhos destampados com amostra foram colocados na estufa a 105 °C até massa constante por 3 h, e após resfriamento em dessecador, pesados para obtenção da massa seca.

O teor de umidade foi determinado de acordo com a norma técnica AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM E-871-82 (2006). Esse valor é adquirido pela diferença entre as massas das amostras, antes e logo após secagem, através da Equação 1.

$$W = ((m_1 - m_2)/m_2) \times 100 \quad (1)$$

Onde:

W = teor de umidade da biomassa (%);

m₁ = massa úmida (g);

m₂ = massa seca (g).

Teor de voláteis

Após determinação da umidade, os cadinhos tampados e com suas respectivas amostras, foram colocados em uma mufla pré-aquecida a 950 °C por 6 min., um de cada vez, e depois armazenados em dessecador até seu resfriamento.

O teor de voláteis foi determinado pela Equação 2.

$$TV = ((m_2 - m_3) / m_2) \times 100 \quad (2)$$

Onde:

TV = teor voláteis (% b.s.);

m₂ = massa seca (g);

m₃ = massa de carbono e cinzas (g).

Teor de cinzas

Os cadinhos destampados e suas tampas foram colocados na mufla, sem pré-aquecimento, até atingir a temperatura de 750 °C, sendo mantido por 3 h, em seguida colocados no dessecador até o seu resfriamento e pesados. O teor de cinzas foi calculado pela Equação 3:

$$CZ = (m_4/m_2) \times 100 \quad (3)$$

Onde:

CZ = Teor de cinzas (% b.s.);

m₂ = massa seca (g)

m₄ = massa de cinzas (g)

Teor de Carbono Fixo

Depois de serem feitas as determinações dos teores de umidade, de material volátil e cinzas, foi determinado o teor de carbono fixo das amostras por diferença (Equação 4).

$$CF (\%) = (m_3 - m_4) / m_2 \quad (4)$$

Onde:

CF (%) = teor de carbono fixo (% b.s.);

m₂ = massa seca (g);

m₃ = massa do carbono e cinzas (g);

m₄ = massa das cinzas (g);

Poder calorífico superior

O poder calorífico superior (PCS) foi determinado em bomba calorimétrica automática da marca IKA, modelo C5000, segundo norma AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM D-2015-66 (2012).

Os dados foram analisados por meio de estatística descritiva e apresentados a seguir em figuras e tabelas.

Resultados e Discussão

Considerando que o Brasil, em especial a Região Oeste do Estado do Paraná, é eminentemente agrícola, e que possui grande volume de resíduos agroindustriais de natureza lignocelulósica, mas ainda com baixo índice de aproveitamento destes resíduos.

Frequentemente eles não são utilizados como fonte de energia, por terem características energéticas pobres (baixa densidade, baixo poder calorífico e alto teor de umidade), causando altos custos durante o transporte, manuseio e armazenamento. Porém alguns destes inconvenientes podem ser superados se os resíduos de biomassa forem densificados em pellets ou briquetes a fim de fornecer mais energia por unidade de volume, e melhorar o transporte e o armazenamento.

Um parâmetro de grande importância para o processo de produção de pellets é o teor de umidade do material, cujo, o valor máximo permitido é de 12-13 % (OLIVEIRA, 2014). Por isso, a importância de garantir que os materiais estejam com o teor de umidade apropriado para a peletização, pois a alta umidade, valores acima de 15 % podem levar à quebra do pellet ou à degradação biológica durante o transporte e armazenamento, além de reduzir o valor do calor de combustão, a temperatura da câmara de queima e a temperatura dos gases de escape. Por outro lado, baixo teor de água (<5 %) pode resultar em perda de material, bem como a sua quebra, geração de finos durante o transporte e armazenamento (DIAS *et al.*, 2012).

A Tabela 2 apresenta o resultado da análise de teor de umidade no momento da coleta dos materiais. Nota-se que o lodo de biodigestor possuía um elevado teor de umidade, mesmo ele passando pela prensa desaguadora no sistema de tratamento de efluentes do abate de suínos. Sendo, portanto, necessário à sua secagem a fim de alcançar o teor de umidade recomendado para peletização.

Tabela 2 – Teor de umidade na coleta.

Amostras	Teor de Umidade (%)
Capim BRS Capiáçu	10,68
Lodo	87,10

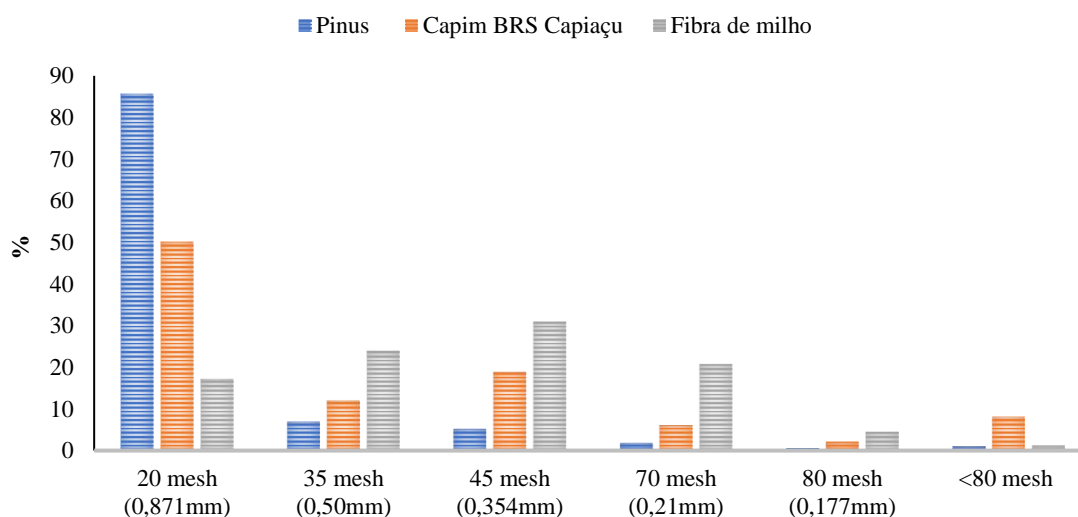
Fonte: A autora (2023).

Outro parâmetro fundamental para a produção de pellets é o tamanho das partículas dos materiais. Dias *et al.* (2012) relatam que o tamanho das partículas é muito importante para determinar a qualidade e durabilidade de um pellet ou briquete. Quanto menor for o tamanho de partícula, menor será a porosidade do produto final e, portanto, maior será a sua densidade. A baixa porosidade do pellet ou briquete pode, entretanto, dificultar a queima devido ao menor número de espaços livres para difusão de calor.

A matéria-prima ideal deverá ser composta por uma mistura de partículas de vários tamanhos, sendo que a medida máxima depende do tipo de material e do diâmetro da matriz. Geralmente é aceitável uma granulometria entre 5 e 10 mm, enquanto que grandes prensas com matrizes de 125 mm de diâmetro aceitam partículas de até 15 mm (MISSAGIA *et al.*, 2011).

Na Figura 5 pode ser observado o resultado da análise de granulometria, sendo que a maioria dos materiais ficou retido na peneira de 20 mesh, que corresponde a 0,871 mm, sendo, portanto, adequados ao processo de peletização.

Figura 5 – Perfil Granulométrico dos materiais. Fonte: A autora (2023).



Na Tabela 3 é possível visualizar o resultado da análise imediata, onde foram determinados os teores de umidade (W), materiais voláteis (TV), carbono fixo (TC) e cinzas (CZ) dos materiais.

De acordo com Vassilev *et al.* (2010), o teor de umidade da biomassa pode variar numa ampla gama de 3-63 %. Este parâmetro é muito importante, uma vez que pode variar substancialmente dependendo do tipo de biomassa e o nível de secagem. Por exemplo, os resíduos de cereais podem possuir baixos teores de umidade, enquanto que nos resíduos florestais os teores de umidade podem ascender a 70 % (MENDES, 2011).

Tabela 3 – Valores do teor de umidade, carbono fixo, voláteis e cinzas.

Amostras	Umidade (%)	Carbono fixo (%)	Voláteis (%)	Cinzas (%)
Capim BRS Capiaçú	5,26	18,54	72,94	8,79
Lodo	1,35	5,80	67,66	26,39
Fibra de milho	8,19	13,36	86,33	0,29
Pinus	5,25	14,85	83,83	1,30

Fonte: A autora (2023).

O teor de umidade corresponde à quantidade de água presente num determinado produto, podendo ser muito elevado em biomassas frescas, expostas ao ar e mais baixo em biomassas processadas como pellets e briquetes. A utilização de biomassa como biocombustível sólido exige assim o conhecimento dos níveis de umidade, sendo fundamental reduzi-la mediante secagem para uma utilização segura e eficiente (FERNANDES, 2015).

Portanto, como pode ser observado na Tabela 3, após a secagem os materiais reduziram seus teores de umidade, sendo menor no Lodo (1,35 %) e maior na Fibra de milho (8,19 %), sendo interessante uma mistura destes materiais para peletização.

O teor de umidade é um fator importante a ser observado, pois quanto menor for este valor, menor será a quantidade de energia gasta no processo de carbonização da madeira e maior o poder calorífico do material. O teor de voláteis e o teor de cinzas (ou inertes) fornecem informações aproximadas da combustibilidade dos resíduos. O teor de cinzas é a percentagem em massa de cinzas após a queima completa do briquete ou pellet. A maioria dos resíduos de biomassa tem baixo teor de cinzas, exceto a casca de arroz que pode conter até cerca de 25 % de cinzas, devido ao alto conteúdo de sílica da matéria prima (DIAS *et al.*, 2012).

O teor de cinzas pode variar entre 0,1 % a 46,3 %. Sendo assim um parâmetro importante nas análises de biomassa porque dá indicação sobre o conteúdo de matéria inorgânica que dará origem à formação de cinzas nos sistemas de combustão e fornece também indicação sobre a possível existência de contaminação da biomassa (VASSILEV *et al.*, 2010).

Como pode ser observado na Tabela 3 o maior teor de cinzas foi do Lodo (26,39 %), sendo importante a realização de análises complementares a fim de identificar os elementos constituintes. Altos teores de cinzas podem levar à corrosão do queimador e a desgastes de todos os equipamentos por abrasão, o que se torna mais crítico quando o teor de cinzas for superior a 4 % (MANDE, 2009).

Sabe-se que os principais elementos inerentes à biomassa que formam a matriz das cinzas são o Ca, Si, Mg, K, Na, Al, Fe e P. No processo de combustão, o combustível é oxidado formando-se óxidos destes elementos CaO, SiO₂, MgO, K₂O, Na₂O, Al₂O₃, Fe₂O₃ e P₂O₅. Alguns destes óxidos podem combinar-se formando compostos mais complexos que podem causar problemas em alguns equipamentos de combustão de biomassa (PALAZON, 2013).

A porcentagem de voláteis está compreendida no intervalo de 76 a 86 % (base seca) estabelecido para biomassa vegetal (MORAES, 2007). Na Tabela 3 pode-se constatar que a maioria dos materiais apresentaram valores elevados, contribuindo desta forma, com eficiência

no processo de combustão. De acordo com Williams *et al.* (2012) o teor de voláteis afeta, em particular, a estabilidade da chama, a formação de poluentes e a eficiência global da combustão.

O carbono fixo, por sua vez, tem relação direta com o poder calorífico. Um maior teor de carbono fixo implica em um maior tempo de residência dentro do aparelho de queima (CHAVES *et al.*, 2013).

Conforme Vale, Brasil e Leão (2002) o teor de carbono fixo depende principalmente do teor de material volátil, já que os teores de cinzas para madeira são baixos. Desta forma, madeira com maiores teores de material volátil tem menores teores de carbono fixo.

Portanto, como pode-se observar na Tabela 3 o menor valor de carbono fixo foi do Lodo (5,80 %) com melhor correlação TV /TC.

Os materiais também foram submetidos à análise de poder calorífico superior através de bomba calorimétrica. O PCS indica a quantidade de energia liberada durante a transferência de calor, relacionada à eficiência do processo, ou seja, quanto maior for o PCS, mais eficiente (VIEIRA, 2012).

Gentil (2008) afirma que embora variáveis, os briquetes e pellets produzidos no Brasil possuem um Poder Calorífico Superior de 17,991 a 20,083 MJ kg⁻¹. Portanto, como pode ser observado na Tabela 4, a maioria dos materiais, com exceção do Lodo (14,44 MJ kg⁻¹) estão de acordo com a literatura, e apresentam bons resultados relacionados ao poder calorífico superior.

Tabela 4 – Poder calorífico superior dos materiais.

Amostras	Poder Calorífico Superior (MJ kg ⁻¹)
Capim BRS Capiapu	17,24
Lodo	14,44
Fibra	18,42
Pinus	19,52

Fonte: A autora (2023).

Conclusões

Portanto, conclui-se que os resultados apresentados nas análises de teor de umidade, perfil granulométrico, análise imediata e poder calorífico superior são favoráveis ao reaproveitamento do Lodo de Estação de Tratamento de Efluentes do Abate de Suínos, Processamento de Milho, Serragem de Pinus e Capim Elefante BRS Capiapu para a produção de pellets.

Considerando que a maior produção de pellets no Brasil tem como matéria-prima a biomassa de pinus, seria interessante a realização da mistura destes materiais com outras fontes de biomassa como foi apresentado neste trabalho visando a peletização com propriedades que atendam as especificações do mercado, além de apresentarem grande potencial energético, sendo bons substitutos à lenha.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASIEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7402**: Carvão Vegetal – Determinação granulométrica. Rio de Janeiro, 1982.

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM E-871-82**: Standard test method for moisture analysis of particulate wood fuels. Philadelphia, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM E-872-82**: Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels. Philadelphia, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM E-870-82**: Standard Test Method for Analysis of Wood Fuels, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL. **ASTM D-1102-84**: Standard Test Method Ash in Wood, Philadelphia, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM D-2015-66**: Standard test method for gross calorific value of solid fuel by the adiabatic bomb calorimeter. Philadelphia, 2012.

BRIDGWATER, T. Review: Biomass for energy. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 86, n. 12, p. 1755–1768, 2006.

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

DEMIRBAS, A. Biorefineries: Current activities and future developments. **Energy conversion and management**, v. 50, n. 11, p. 2782–2801, 2009.

DIAS, J. M. C. de S.; SANTOS, D. T. dos; BRAGA, M.; ONOYAMA, M. M.; MIRANDA, C. H. B.; BARBOSA, P. F. D.; ROCHA, J. D. **Produção de briquetes e peletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. Brasília: Embrapa Agroenergia, 2012. 130p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balço Energético Nacional 2021: Ano Base 2020**. Rio de Janeiro-RJ, 2021.

FERNANDES, P. I. C. **Estudo da Biomassa Florestal Residual Consumida em Centrais Termoeletricas**. 2015. 76p. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente), Universidade de Lisboa, Lisboa, 2015

GENTIL, L. V. B. **Tecnologia e Economia do Briquete de Madeira**. 2008. 195p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal), Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

INSTITUTO DE ECONOMIA - IEA. **Global Energy Review 2020**. 2020.

KIMURA, L. M. **Uma contribuição à pirólise de biomassa: avaliação de alguns resíduos da agroindústria como fonte de energia alternativa**. 2009. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

MAGALHÃES, M. A.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; SILVA, C. M. S.; COSTA, E. V. S.; TRUGILHO, P. F. Chemical properties of pellets of pinus sp. torrefied in a screw type reactor. **Floresta**, v. 48, n. 4, p. 493–502, 2018.

MANDE, S. P. Thermo chemical conversion of biomass. In: KISHORE, V.V.N. **Renewable energy engineering and technology**. New Delhi: The Energy and Resources Institute, 2009. p.705-728

MARTINEZ, D. G.; FEIDEN, A. Potencial do resíduo do processamento da mandioca para produção de etanol de segunda geração. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 6, n. 2, p. 141–148, 2017.

MENDES, C. Biocombustíveis Sólidos – Produção, Qualidade e Utilização no Mercado de Calor. In: WORKSHOP DO LABORATÓRIO ESPECIALIZADO EM BIOCMBUSTÍVEIS SÓLIDOS, 2011, Coimbra. **Anais...** Coimbra, Portugal: Centro da Biomassa para a energia, 2011.

MISSAGIA, B.; GUERRERO, C. NARRA, S.; SUN, Y.; AY, P. KRAUTZ, M H. J. Physicomechanical properties of rice husk pellets for energy generation. **Energy & Fuels**, Washington, v. 25, n. 12, p. 5786-5790, 2011.

MORAES, D. M. **Briquetes de Resíduos Ligno-celulósicos como Potencial Energético para a Queima de Blocos Cerâmicos: Aplicação em uma Indústria que Abastece o Distrito Federal**. 2007. 230p. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil), Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

MUAZU, R. I.; BORRION, A. L.; STEGEMANN, J. A. Life cycle assessment of biomass densification systems. **Biomass and Bioenergy**, v. 107, p. 384–397, 2017.

OLIVEIRA, C. Pelletização: Processo de pelletização. **Revista da Madeira**. n. 138, 2014. Disponível em:

<http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1739&subject=Pelletiza%20de%20pelletiza%20E3o&title=Processo%20de%20pelletiza%20E3o>. Acesso em: 24 mai. 2023.

PALAZON, R. P. **Forest biomass of the Mediterranean – quality and end users** European Union: PROFORBIOMED - Promotion of residual forestry biomass in the Mediterranean basin, 2013. Disponível em:

<http://proforbiomed.eu/sites/default/files/Forest_biomass_end_users.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2023.

PRINS, M. J.; PTASINSKI, K. J.; JANSSEN, F. J. Torrefaction of wood: Part 2. Analysis of products. **Journal of analytical and applied pyrolysis**, v. 77, n. 1, p. 35–40, 2006.

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

SCHUTZ, F.; MASSUQUETTI, A.; ALVES, T. W. Demanda e oferta energética: uma perspectiva mundial e nacional para o etanol. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 16, n. 16, p. 3167–3186, 2013.

SILVA, C. M. S.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; FIGUEIRÓ, C. G.; FIALHO, L. F.; MAGALHÃES, M. A.; CARVALHO, A. G.; CÂNDIDO, W. L. 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.

TUMULURU, J. S.; CHRISTOPHER, T. W.; HESS, J. R.; KEVIN, L. K. A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application, **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 5, n. 6, p. 683-707, 2011.

VALE, A. T.; BRASIL, M. A. M.; LEÃO, A. L. Quantificação e caracterização energética da madeira e casca de espécies do Cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 12, n. 1, p. 71-80, 2002

VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L. K.; VASSILEVA, C. G. An overview of the chemical composition of biomass. **Fuel**, v. 89, n. 5, p. 913-933, may, 2010.

VIEIRA, A. C. M. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas para geração de energia**. 2012. 56p. Dissertação (Mestrado de Energia na Agricultura), Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2012.

VIEIRA, R. DA S.; LIMA, J. T.; MONTEIRO, T. C.; SELVATTI, T. DE S.; BARAÚNAI; E. E. P.; NAPOLI, A. Influência da temperatura no rendimento dos produtos da carbonização de *Eucalyptus microcorys*. **Cerne**, v. 19, n. 1, p. 59–64, 2013.

WANG, C.; PENG, J.; LI, H.; BI, X. T. Oxidative torrefaction of biomass residues and densification of torrefied sawdust to pellets. **Bioresource technology**, v. 127, p. 318–325, 2013.

WILLIAMS, A.; JONES, J. M.; MA, L.; POURKASHANIAN. Pollutants from the combustion of solid biomass fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 38, n. 2, p. 113-137, april. 2012.