

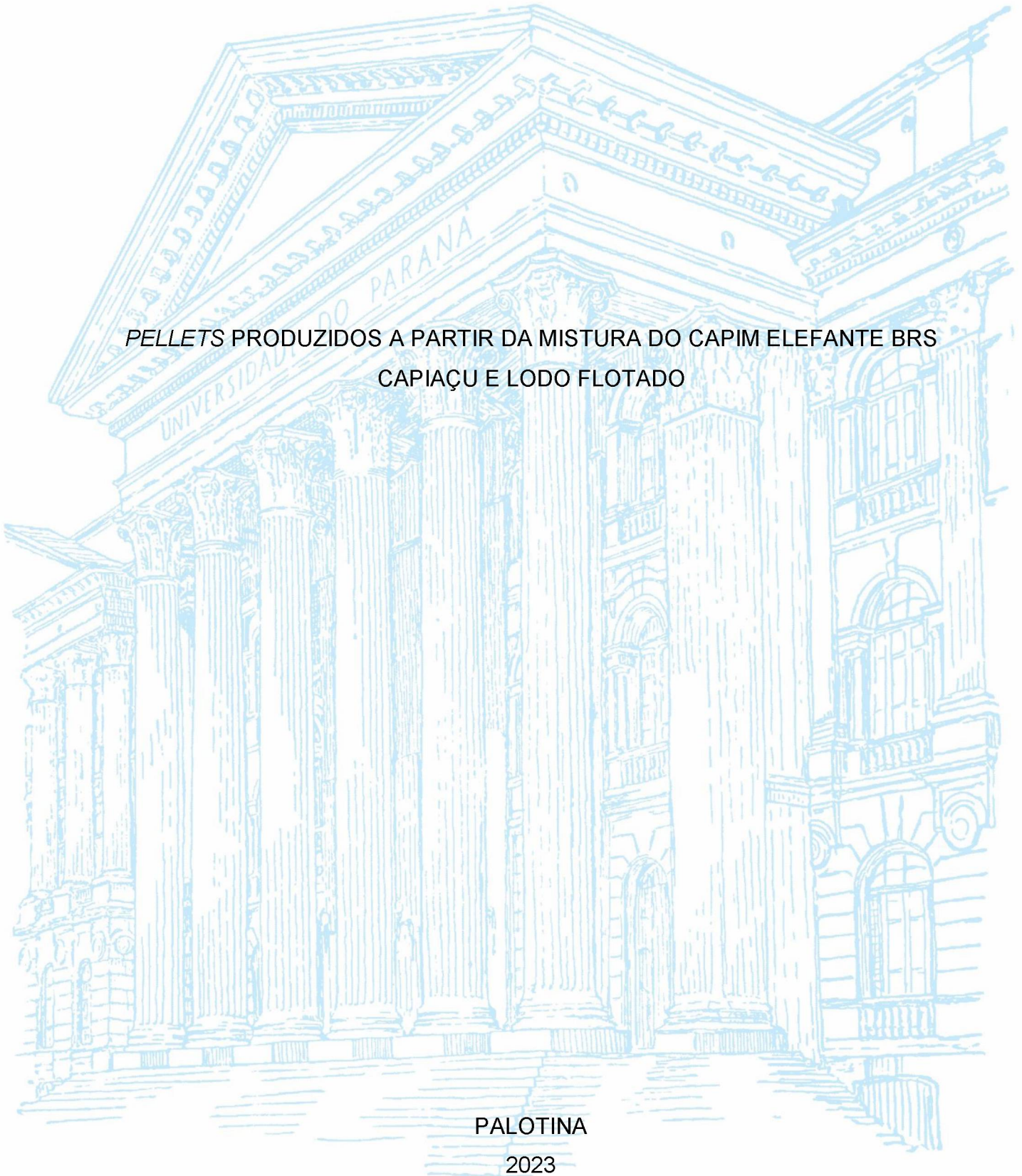
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARIA PAULA ANDRIOLA

PELLETS PRODUZIDOS A PARTIR DA MISTURA DO CAPIM ELEFANTE BRS
CAPIAÇU E LODO FLOTADO

PALOTINA

2023



MARIA PAULA ANDRIOLA

PELLETS PRODUZIDOS A PARTIR DA MISTURA DO CAPIM ELEFANTE BRS
CAPIAÇU E LODO FLOTADO

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Bioenergia, da Universidade Federal do Paraná, Setor Palotina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Bioenergia.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Adriana Ferla de Oliveira

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Lucas Konrad Burin

PALOTINA-PR

2023

Universidade Federal do Paraná. Sistemas de Bibliotecas.
Biblioteca UFPR Palotina.

A573 Andriola, Maria Paula

Pellets produzidos a partir da mistura do capim elefante BRS
Capiacu e lodo flotado / Maria Paula Andriola.
– Palotina, PR, 2023.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná,
Setor Palotina, PR, Programa de Pós-Graduação em Bioenergia.
Orientadora: Prof^a. Dr^a. Adriana Ferla de Oliveira.
Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Lucas Konrad Burin.

1. Biomassa. 2. Peletização. 3. Resíduos agroindustriais.
I. Oliveira, Adriana Ferla de. II. Burin, Eduardo Lucas Konrad.
III. Universidade Federal do Paraná. IV. Título.

CDU 620.9

Bibliotecária: Aparecida Pereira dos Santos – CRB 9/1653

TERMO DE APROVAÇÃO

MARIA PAULA ANDRIOLA

PELLETS PRODUZIDOS A PARTIR DA MISTURA DO CAPIM ELEFANTE BRS CAPIAÇU E LODO FLOTADO

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Bioenergia, Universidade Federal do Paraná, Setor de Palotina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Bioenergia.



Documento assinado digitalmente
ADRIANA FERLA DE OLIVEIRA
Data: 09/01/2024 17:41:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dr^a. ADRIANA FERLA DE OLIVEIRA

Orientadora – Departamento de Engenharia e Exatas, UFPR



Documento assinado digitalmente
RODRIGO SEQUINEL
Data: 09/01/2024 17:26:23-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. RODRIGO SEQUINEL

Departamento de Engenharia e Exatas, UFPR



Documento assinado digitalmente
DILCEMARA CRISTINA ZENATTI
Data: 09/01/2024 15:38:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dr^a. DILCEMARA CRISTINA ZENATTI

Departamento de Engenharia e Exatas, UFPR

Palotina, 20 de novembro de 2023.

Dedico este trabalho à minha prima Maria Clara que me vê como uma irmã e
inspiração.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram no decorrer desta jornada, em especial:

À minha orientadora, professora Dr^a Adriana Ferla de Oliveira, uma pessoa correta, admirável e na qual me inspiro. Obrigada por ter confiado em mim, na elaboração deste trabalho, por toda sua paciência em me atender nos momentos difíceis, e ensinamentos que me permitiram melhorar meu desempenho e crescimento profissional, obrigada por tanto! Também agradeço ao seu marido, professor Luciano, que nos ajudou para fornecimento do capim para elaboração deste trabalho.

Ao professor Dr. Eduardo Burin, que teve papel fundamental na elaboração deste trabalho como coorientador, obrigada por atender minhas dúvidas e pela paciência.

À minha família que mesmo com a ausência e aceitando a falta de tempo, sempre me compreenderam e incentivaram com palavras doces na hora do desespero e me apuraram nos momentos de dificuldade, nunca me deixando desistir.

Aos meus grandes amigos, tanto os mais íntimos como aqueles que estiveram comigo na UFPR nesta caminhada, obrigada pelos conselhos e ajuda na realização do projeto e pelo apoio nos momentos difíceis.

Em especial a minha amiga Anna Maria, que foi minha grande companhia durante esse tempo de convívio no laboratório, pelos almoços e por trabalhar até tarde comigo, sendo momentos muito produtivos e divertidos.

A Tainara e a Maria Eduarda, e ao Prof. Alexandre Leseur dos Santos pelo auxílio em análises.

A todos os mestres do Programa de Pós-Graduação em Bioenergia, que me nortearam na área que escolhi e me transmitiram ensinamentos e valores éticos.

À Universidade Federal do Paraná (UFPR) e ao Programa de Pós-graduação em Bioenergia (PPGB) pela oportunidade e espaço.

Aos técnicos do Bloco de Química, Nutrição e do LPB pela ajuda na realização dos experimentos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001. Portaria N^o206, 4 de setembro de 2018.

“Deixem que o futuro diga a verdade e avalie cada um de acordo com o seu trabalho e realização. O presente pertence a eles, mas o futuro pelo qual eu sempre trabalhei pertence a mim.”

Nikolas Tesla

RESUMO

Pellets são biocombustíveis sólidos produzidos a partir da compactação de biomassa lignocelulósica e outros resíduos industriais. A busca por novas fontes para a produção desses biocombustíveis vem crescendo consideravelmente nos países Europeus e nas Américas. O lodo flotado é um resíduo gerado em grande quantidade nas estações de tratamento de efluentes (ETE), principalmente em indústrias como abatedouros e frigoríficos. Dentre os materiais vegetais, o capim elefante vem sendo alvo de estudos devido a sua alta produtividade e potencial energético, o que gera vantagens em relação a tempo e disponibilidade. Sendo assim, a petelização dessas biomassas e a combinação delas teria um potencial promissor para produção de *pellets* para energia. Neste sentido, o objetivo do presente trabalho foi a produção de *pellets* a partir da mistura da biomassa do Capim BRS Capiáçu, e do lodo flotado de abatedouro de aves e peixes. As misturas propostas resultaram em *pellets* com diferentes proporções de inserção de lodo (0, 10, 20, 40, 60,80 e 100%). O material foi compactado em Peletizadora ATX. Os *pellets* foram caracterizados por análise imediata; densidade aparente e energética, poder calorífico superior e análise termogravimétrica. As variáveis umidade, carbono fixo, materiais voláteis e teor de cinzas, bem como poder calorífico superior dos *pellets*, foram avaliadas por meio da análise de variância. Com o incremento de lodo à biomassa de capim elefante verificou-se a diminuição do teor de carbono fixo e cinzas e o aumento do teor de materiais voláteis e poder calorífico. A densidade aparente dos *pellets* variou de 870 a 1298 kg m⁻³, sendo a menor densidade para T7 (100% lodo) e a maior para T1 (100% capim). Nos termogramas, há semelhanças entre os diferentes tratamentos, no que se refere a maior ou menor adição de lodo a mistura, tratamentos com menor inclusão do lodo possuem característica de degradação de material lignocelulósico. As equações estimadas permitem que as variáveis umidade, carbono fixo, materiais voláteis e teor de cinzas, bem como poder calorífico superior dos *pellets* possam ser estimadas representando uma vantagem em relação a custo e tempo na previsão destes valores. Considerando as análises realizadas, foi possível verificar que os *pellets* produzidos apresentam potencial energético, sendo uma alternativa à demanda energética regional.

Palavras-chave: Peletização; Biomassa; Lodo Flotado; Resíduos agroindustriais, Capim Elefante.

ABSTRACT

Pellets are solid biofuels produced from the compaction of lignocellulosic biomass and other industrial waste. The search for new sources for the production of these biofuels has been growing considerably in European countries and the Americas. Floated sludge is waste generated in large quantities in effluent treatment stations (ETE), mainly in industries such as slaughterhouses and slaughterhouses. Among plant materials, elephant grass has been the subject of studies due to its high productivity and energy potential, which generates advantages in terms of time and availability. Therefore, the pelletization of these biomasses and their combination would have promising potential for producing *pellets* for energy. In this sense, the objective of the present work was the production of *pellets* from a mixture of the biomass of Capim BRS Capiçu, and floated sludge from poultry and fish slaughterhouses. The proposed mixtures resulted in pellets with different sludge insertion proportions (0, 10, 20, 40, 60,80 and 100%). The material was compacted in an ATX Pelletizer. The *pellets* were characterized by immediate analysis; apparent and energetic density, higher calorific value and thermogravimetric analysis. The variables humidity, fixed carbon, volatile materials and ash content, as well as the higher calorific value of the *pellets*, were evaluated using analysis of variance. With the addition of sludge to the elephant grass biomass, there was a decrease in the fixed carbon and ash content and an increase in the content of volatile materials and calorific value. The apparent density of the *pellets* ranged from 870 to 1298 kg m⁻³, with the lowest density being for T7 (100% silt) and the highest for T1 (100% grass). In the thermograms, there are similarities between the different treatments, regarding the greater or lesser addition of sludge to the mixture, treatments with less sludge inclusion have the characteristic of degradation of lignocellulosic material. The estimated equations allow the variables humidity, fixed carbon, volatile materials and ash content, as well as the higher calorific value of the *pellets* to be estimated, representing an advantage in relation to cost and time in predicting these values. Considering the analyzes carried out, it was possible to verify that the pellets produced have energy potential, being an alternative to regional energy demand.

Keywords: Pelletization; Biomass; Sludge; Agroindustrial Waste; Elephant Grass

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - EXPORTAÇÃO DE PRODUTOS SÓLIDOS DE MADEIRA, 2020	21
TABELA 2 - PRODUÇÃO MUNDIAL DOS PRINCIPAIS PRODUTOS PARA OBTENÇÃO DE ENERGIA	24
TABELA 3 - ANÁLISE APROXIMADA DAS AMOSTRAS DE LODO ADICIONADAS AOS CAVACOS	29
TABELA 4 - ANÁLISE DO LODO FRIGORÍFICO.....	29
TABELA 5 - TRATAMENTOS COM SUAS RESPECTIVAS PORCENTAGENS	37
TABELA 6 - ANÁLISES DOS TEORES DE LIGNINA, CELULOSE E HOLOCELULOSE	39
TABELA 7 - ANÁLISES E REFERENCIAS PARA CARACTERIZAÇÕES DOS <i>PELLETS</i> JÁ PRODUZIDOS	44
TABELA 8. PERFIL GRANULOMÉTRICO DAS AMOSTRAS DE LODO E CAPIAÇU.	47
TABELA 9 - RESULTADO DA CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA PARA O CAPIM BRS CAPIAÇU E COMPARAÇÃO COM DADOS DA LITERATURA.....	51
TABELA 10 - ANÁLISE IMEDIATA ANTES DO PROCESSO DE PELETIZAÇÃO ...	52
TABELA 11 - ANÁLISE IMEDIATA DOS TEORES DE UMIDADE, CARBONO, VOLÁTEIS E CINZAS PARA OS <i>PELLETS</i>	53
TABELA 12 – PODER CALORÍFICO SUPERIOR, DENSIDADES A GRANEL E APARENTE, DENSIDADES ENERGÉTICAS A GRANEL E APARENTE DOS <i>PELLETS</i>	53
TABELA 13 - DENSIDADE A GRANEL E ENERGÉTICA CITADAS NA LITERATURA PARA <i>PELLETS</i>	54
TABELA 14 - RELAÇÃO DOS EVENTOS OBSERVADOS NOS TERMOGRAMAS	55
TABELA 15 - ANÁLISE DE REGRESSÃO PARA O <i>PELLET</i> QUANTO A ADIÇÃO DE LODO FLOTADO.....	61

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

- TU - Teor de umidade
- TV - Teor de voláteis
- TCF - Teor de carbono fixo
- TCZ - Teor de cinzas
- PC - Poder calorífico
- PCS - Poder calorífico superior
- PCI - Poder calorífico inferior

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS.....	17
1.1.1 Objetivo geral.....	17
1.1.2 Objetivos específicos.....	18
2 REVISÃO DA LITERATURA	19
2.1 BIOCOMBUSTÍVEIS SÓLIDOS – <i>PELLETS</i>	21
2.2 PRODUÇÃO DOS <i>PELLETS</i>	23
2.3 RESÍDUOS E BIOMASSA.....	24
2.3.1 Capim Elefante BRS Capiapu.....	24
2.3.2 Lodo flotado de tratamento de efluente agroindustrial.....	25
2.4 ANÁLISE IMEDIATA DOS MATERIAIS.....	30
2.4.1 Teor de Umidade.....	31
2.4.2 Teor de Voláteis.....	31
2.4.3 Teor de Cinzas.....	31
2.4.4 Teor de Carbono Fixo.....	32
2.4.5 Poder Calorífico.....	32
2.5 ANÁLISE QUÍMICA DA BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA.....	33
2.6 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA).....	33
3 MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1 COLETA DAS AMOSTRAS, PROCESSAMENTO E PELETIZAÇÃO.....	34
3.1.1 Teor de umidade no momento da coleta.....	36
3.1.2 Processamento dos materiais.....	36
3.1.3 Peletização.....	38
3.2 ANÁLISE DOS PARÂMETROS FÍSICOS E QUÍMICOS.....	39
3.2.1 Perfil granulométrico.....	39
3.2.2 Análise química do capim elefante BRS Capiapu.....	39
3.2.3 Análise Imediata.....	41
3.3 DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR.....	43
3.4 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA).....	43
3.5 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE.....	44
3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	45

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DAS AMOSTRAS	46
4.2 AVALIAÇÃO QUALITATIVA DOS <i>PELLETS</i>	48
4.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E ENERGÉTICA DAS MATÉRIAS- PRIMAS E DOS <i>PELLETS</i> PRODUZIDOS	51
4.3.1 Análise imediata.....	52
4.3.2 Densidade e energia	53
4.3.3 Apresentação da análise termogravimétrica (TGA).....	55
4.4 ANALISE ESTATÍSTICA.....	61
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	63
REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

Após a grande depressão de 1929 nos Estados Unidos, o engenheiro Robert T. Bowling desenvolveu um combustível de baixo custo, feito a partir da compactação de resíduos de indústrias madeireiras, como serragens e cavacos, possuindo qualidade necessária para substituir o carvão mineral. Este novo biocombustível, de aparência granulada, conhecido hoje como *pellet*, chamou a atenção por sua queima lenta e limpa, produzindo um alto teor de energia (QUÉNO, 2015).

Na Suécia, no ano de 1990, o país deliberou a diminuição da aplicação de combustíveis fósseis, com intuito de reduzir o uso de petróleo, e também a dependência de países exportadores de petróleo. Essa situação ocasionou a diminuição de gases geradores do efeito estufa. Além disso, a utilização de energia limpa para aquecimento residencial, tornou o *pellet* mais barato que o óleo e o gás, aumentando a venda de fogões e outros sistemas de aquecimento, e conseqüentemente, a demanda por *pellets*, oportunizando a entrada de novos produtos no mercado (GARCIA, 2008).

Os *pellets* são resultado da densificação da madeira ou transformação física do material lignocelulósico (serragem de madeira, bagaço de cana-de-açúcar, resíduos lignocelulósicos em geral) em biocombustível sólido, de formato cilíndrico (PROTÁSIO *et al.*, 2015). Resumidamente, “*pellet* é um biocombustível granulado à base da biomassa vegetal moída e compactada em alta pressão” (QUÉNO *et al.*, 2019). Esse biocombustível sólido, apresenta vantagens que permitem sua comercialização internacional, como possuir baixo teor de umidade que permite uma alta densidade energética, verte eficiência térmica nas conversões de energia e baixo custo no transporte pela redução volumétrica da biomassa. Além disso, sua forma facilita o manuseio, armazenamento, e o processo de queima do produto em equipamentos industriais, como caldeiras e aquecedores de aviários (GARCIA *et al.*, 2018).

Grande parte da matéria-prima utilizada para a produção de *pellets*, é oriunda da atividade florestal. Desde os subprodutos não úteis das indústrias madeireiras, até os resíduos da exploração florestal, como galhos e tocos, são recolhidos e passam pelo processo de peletização. Processo este que compreende

etapas como trituração, peneiração, secagem, até obter o resultado final, sendo um composto 100% natural e de elevado teor calorífico (QUÉNO *et al.*, 2019).

No Brasil, a utilização de *pellets* para geração de energia ainda é pouco conhecida, visto que as indústrias atuais para estes fins, tem sua produção voltada para o mercado externo. Porém, como o consumo de *pellets* vem crescendo cada vez mais no continente europeu, existe a expectativa para o aumento da produção no Brasil, o que implica em uma maior disponibilidade de matéria-prima, e plantios florestais e agrícolas voltados para a manufatura de *pellets* (SHETTINI *et al.*, 2016).

Algumas agroindústrias estão utilizando o lodo flotado e centrifugado para a queima juntamente com o cavaco para geração de energia. No entanto, alguns problemas são observados como controle da chama da fornalha, incrustações e características na composição variável do material e concentração de poluentes nos gases de combustão (MANTOVAN, 2022).

Como os *pellets* apresentam a vantagem de possuírem maior densidade energética por unidade de volume, composição fixa, entre outros, a produção de *pellets* com biomassa vegetal de capim elefante BRS Capiaçú e lodo flotado podem produzir uma queima controlada na caldeira. Assim, teríamos um biocombustível de características homogêneas, de concentração e composição de gases conhecida ao final da queima.

Neste sentido, a busca por combustível renovável, a base de biomassa que possa substituir parcial ou totalmente a madeira, utilizando resíduos agroindustriais, apresenta-se como uma boa opção para produção de energia, atendendo ao que se trata de uma fonte renovável e descentralizada, promovendo mais emprego e renda adicional a população (COUTO *et al.*, 2004).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo produzir e caracterizar *pellets* a partir da combinação de lodo flotado de estação de tratamento de efluente de frigorífico de aves e peixes com biomassa lignocelulósica de capim elefante BRS Capiaçú.

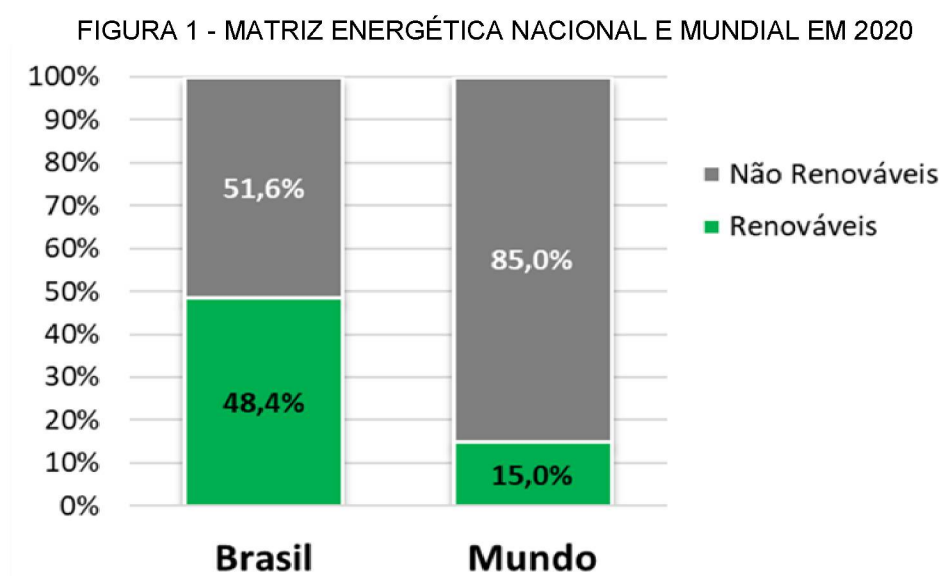
1.1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar as biomassas e os *pellets* quanto aos teores de umidade, carbono fixo, materiais voláteis e cinzas, por meio de análise imediata;
- Avaliar a densidade aparente e a granel dos *pellets* produzidos e o poder calorífico superior e a densidade energética;
- Combinar quantidades variadas de lodo e capim a fim de encontrar a melhor razão de mistura;
- Realizar o estudo termogravimétrico dos *pellets* produzidos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A utilização de energias renováveis ganha cada vez mais estima na matriz energética dos países, uma vez que além do apelo ambiental representa segurança energética para estes.

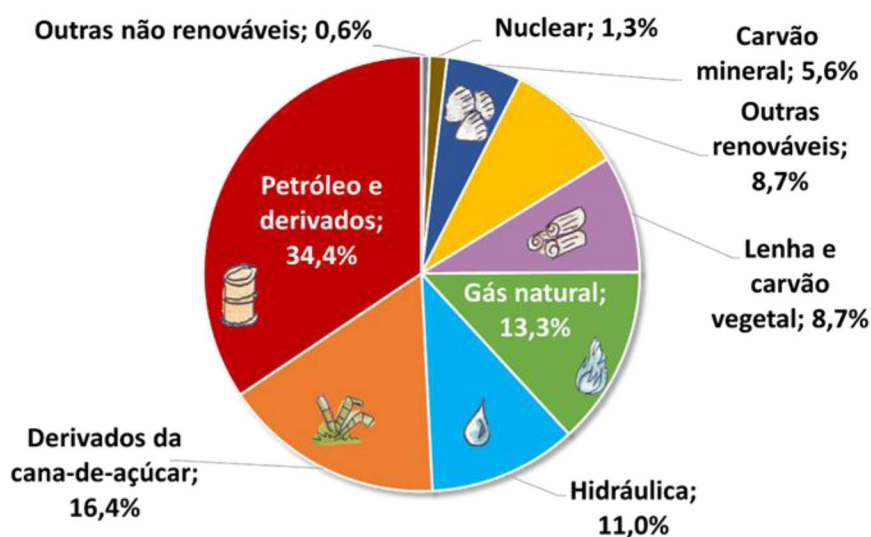
Comparando o consumo de energia proveniente de fontes renováveis e não renováveis no Brasil e no mundo para o ano de 2020, percebe-se que a matriz energética brasileira é três vezes mais renovável do que a mundial (Figura 1).



FONTE: EPE (2020).

Em 2021 somando lenha e carvão vegetal, hidráulica, derivados de cana e outras renováveis, as renováveis totalizam 44,8%, quase metade da nossa matriz energética (Figura 2), mostrando que o Brasil segue forte na utilização de energéticos renováveis.

FIGURA 2 - MATRIZ ENÉRGICA DE 2020



FONTE: BEN (2022).

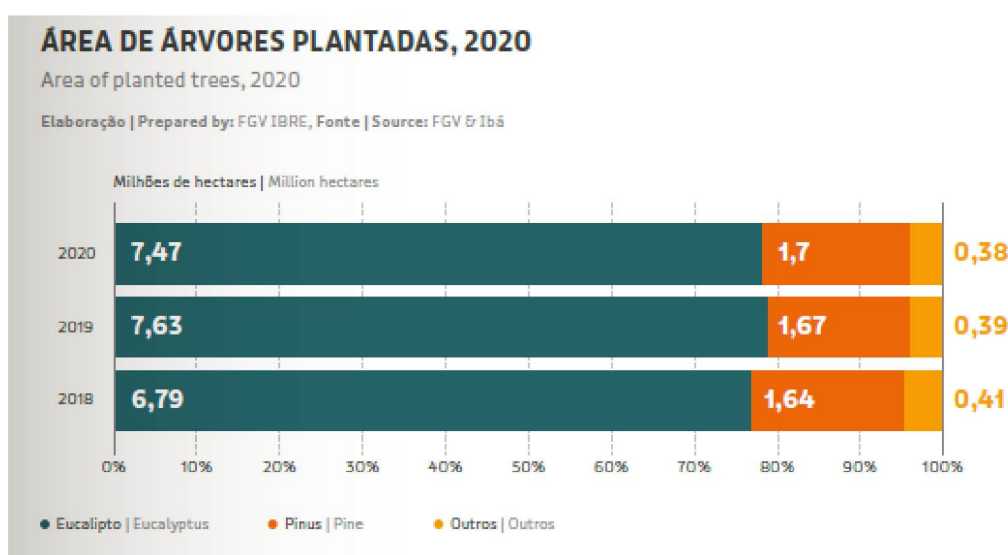
A biomassa florestal como insumo energético possui grande importância para o Brasil seja para a produção de carvão vegetal seja para a produção de madeira para energia.

A cobertura florestal do mundo é de 4,06 bilhões de hectares. O Brasil apresenta a segunda maior área de florestas, com 497 milhões de hectares, ficando atrás da Rússia, com 815 milhões de hectares (FAO, 2022).

As florestas plantadas abastecem cerca de 72%, da produção de madeira roliça para fins energéticos (lenha) no Brasil, ficando as florestas nativas com o restante de 28% (IBGE, 2018). Neste caso, a biomassa florestal, representa a terceira energia da matriz nacional. Atualmente, o Eucalipto e o Pinus são as principais fontes de biomassa para energia (IBÁ, 2022), e devido aos avanços tecnológicos, são observados alto índices de produtividades em florestas plantadas para estes gêneros em espaçamentos de 3,0m x 2,0m a 3,0m x 3,0m (SANTOS *et al.*, 2013).

Em 2020 o Brasil possuía 9,5 milhões de hectares de florestas plantadas, sendo 7,47 milhões de hectares de Eucalipto, 1,7 milhões de hectares de Pinus e 0,38 milhões de hectares com outras espécies (Figura 3) (IBÁ, 2020).

FIGURA 3 - ÁREA DE FLORESTAS PLANTADAS, 2020



FONTE: IBÁ (2020).

A exportação de produtos da madeira (Tabela 1) indica que se trata de um material versátil com grande volume de exportação, podendo-se chamar a atenção para os biocombustíveis sólidos *pellets* com um volume exportado próximo a 361.500 toneladas em 2020, um aumento de 66% se comparado ao ano anterior.

TABELA 1 - EXPORTAÇÃO DE PRODUTOS SÓLIDOS DE MADEIRA, 2020

Produto	Quantidade exportada, 2020	Varição em relação a 2019
Compensado de pinus	2.465.504 m ³	20%
Compensado de eucalypto	53.548 m ³	*
Lâminas de pinus	183.9942 m ³	37%
Lâminas tropical	83.625 m ³	*
Madeira serrada de pinus	3.033.861 m ³	*
Madeira perfilada de pinus	164.568.133 kg	13%
Pinos engenhairados	4.028.076 kg	-29%
Pisos maciços	69.866.937 kg	27%
Portas	169.125.340 kg	30%
<i>Pellets</i>	361.464.277 kg	66%
Toras de pinus	314.367.891 kg	*

FONTE: IBÁ (2020).

2.1 BIOCOMBUSTÍVEIS SÓLIDOS – PELLETS

Os *pellets* são biocombustíveis sólidos que produzem energia limpa e sua utilização vem crescendo cada vez mais em países desenvolvidos e subdesenvolvidos, devido a sua queima eficiente e sua baixa umidade e tamanho, além de ser uma opção relativamente barata e de fácil armazenamento se comparado aos seus concorrentes, carvão e lenha (CORTEZ *et al.*, 2008).

Com diâmetro variando entre 4 e 10 mm e comprimento variável de $\leq 5 \times$ diâmetro, os *pellets* são corpos cilíndricos (Figura 4) de densidade superior $1,10 \text{ kg dm}^{-3}$ e umidade $< 12\%$ (SANTOS *et al.*, 2013).

FIGURA 4 - *PELLETS* DE MADEIRA



FONTE: GARCIA (2013).

Apesar do Brasil não ser um dos principais países exportadores de *pellets*, segundo o relatório do Instituto Brasileiro de Árvores (IBÁ) (2021) o Brasil exportou cerca de 345.200.000 toneladas de *pellets*, um número significativo, possibilitando melhor representatividade no mercado futuramente.

O Brasil possui cerca de 18 indústrias produtoras de *pellets*, mas somente quatro tipos de materiais lignocelulósicos são mais utilizados, sendo estes: pinus, eucalipto, acácia-negra, bagaço-de-cana e casca de café (GARCIA *et al.*, 2018).

Segundo Quéno *et al.*; (2019), o Brasil aparece na 35ª posição do *ranking* dos países produtores de *pellets*, produção baseada na transformação de maravalha de madeira de Pinus, resultando em um produto de boa qualidade que obtêm certificado europeu Premium *ENplus*. Evidenciando, assim, o potencial do país em produzir este biocombustível sólido.

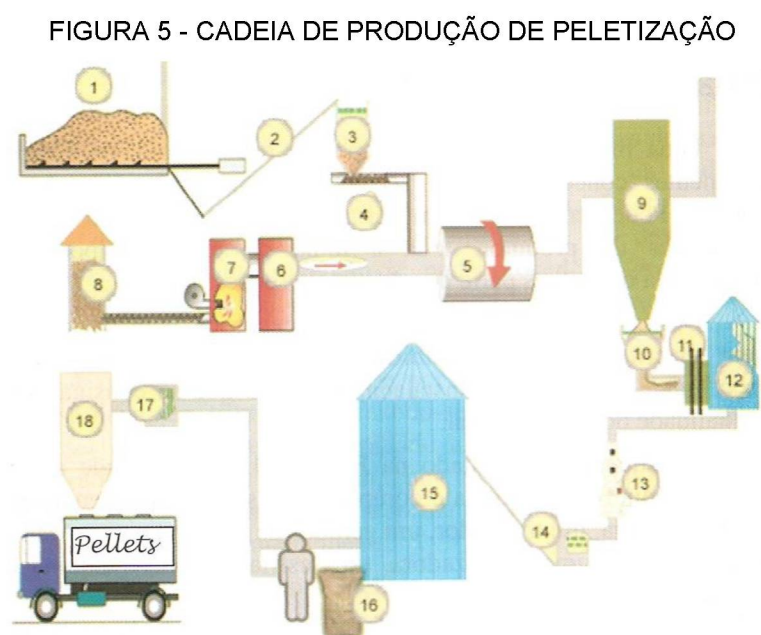
Entretanto, um levantamento realizado pelo IBÁ, em 2020, o mercado global de *pellets* chegou a US\$ 9 bilhões, sendo a Europa o maior consumidor. Apesar do Brasil ainda ter sua produtividade modesta, tem-se grande potencial de aproveitamento de biomassa e atender a demanda Nacional e Internacional. A Europa concentra 52% das plantas industriais e os EUA 41%.

2.2 PRODUÇÃO DOS PELLETS

Os *pellets* são produzidos a partir da biomassa compactada em alta pressão, que provoca a transformação dos componentes sob efeito do calor gerado pela fricção na passagem pelos furos da matriz, a partir de uma prensa peletizadora, conforme Figura 5 (KOALA ENERGY, 2022).

Uma linha de produção de *pellets* é constituída por um ciclo de produção, dividido em várias seções. Esse processo é composto por um depósito de matéria-prima (1), tapete de transporte (2), limpeza primária (3), regulador (4), um secador (5), um recuperador de cinzas (6), caldeira (7), silo de combustível (caldeira) (8), separador de vapor (9), limpeza secundária (10), triturador (11), silo de serragem (12), peletizadora (13), resfriador (14), silo de armazenamento (15), embalagem (16), limpeza (17) e silo de carga (18), conforme a Figura 5.

O processo de peletização propriamente dito ocorre na peletizadora (13), sendo os *pellets* produzidos encaminhados para o resfriador (14) que garante a qualidade do produto final (SANTOS *et al.*, 2013) (Figura 5).



FONTE: SANTOS *et al.* (2013).

2.3 RESÍDUOS E BIOMASSA

A quantidade de resíduos que podem ser usados para produção de biocombustíveis sólidos é abundante. Alguns possuem propriedades que permitem a combustão direta sem interferir nos seus aspectos físicos, enquanto outros tipos requerem um processo mais específico (YILMAZ *et al.*, 2018).

A tabela a seguir (Tabela 2), mostra os principais resíduos utilizados mundialmente. A cana-de-açúcar é a matéria-prima de maior produção, seguida pelo milho. A mandioca, mesmo apresentando umas das menores produções, vem sendo uma ótima alternativa no que diz respeito à produção de combustível sólido.

TABELA 2 - PRODUÇÃO MUNDIAL DOS PRINCIPAIS PRODUTOS PARA OBTENÇÃO DE ENERGIA.

Matéria-prima	Produção (Mt)	Produção de resíduos (Mt)
Cana (bagaço)	1.318.178.070	395.453.421
Arroz (casca)	608.496.284	172.934.643,9
Milho (palha e sabugo)	705.293.226	934.442.995,1
Soja (restos de cultura)	206.409.525	320.966.811,4
Algodão	67.375.042	16.843.760,5
Beterraba	237.857.862	--

FONTE: Biomassa para Energia, Unicamp (2008).

2.3.1 Capim Elefante BRS Capiaçú

O Capim Elefante BRS Capiaçú trata-se de um tipo de capim clonado a partir da espécie capim-elefante (*Pennisetum purpureum Schum*). Desenvolvida pela Embrapa em parceria com outras instituições, ela é voltada para todos os pecuaristas que façam uso volumoso na forma de silagem ou fornecido fresco (PEREIRA *et al.*, 2016).

O BRS Capiaçú apresenta elevado rendimento na forma de silagem ou picado verde. Além disso, atinge até 4 m de altura, se caracterizando como porte alto (Figura 6). Ao cultivar ganha destaque, devido a sua grande produtividade e pelo valor nutritivo da forragem, tendo um rendimento 30% superior, quando comparada com outras cultivares de capim-elefante (PEREIRA *et al.*, 2016).

FIGURA 6 - CAPIM BRS CAPIAÇU



FONTE: VIVERGRASS (2022).

Devido ao seu poder calorífico, ao alto teor de fibra e do teor de umidade de 15 % após processo de secagem, o BRS Capiaçú possui potencial para aplicação como biomassa energética (PEREIRA *et al.*, 2016). As vantagens do capim elefante frente as demais biomassas estão relacionadas com o menor ciclo produtivo (6 meses), melhor fluxo de caixa e mecanização total do cultivo. O emprego da espécie como fonte alternativa de energia tem sido em processos de combustão direta, gaseificação e carvoejamento, além disso, algumas empresas, como Nativas do Brasil Comércio e Investimentos Ltda., estão utilizando o capim elefante para produção de *pellets* e briquetes (MARAFON; MARINHO; RANGEL, 2012)

2.3.2 Lodo flotado de tratamento de efluente agroindustrial

A atividade industrial vem crescendo a cada ano em todo o mundo, sendo um importante processo para o desenvolvimento de um país. Esse rápido crescimento, conseqüentemente, também aumentou a poluição de fontes naturais de água e terras por lodo industrial. O lodo é um subproduto resultado dos processos de tratamento de águas residuais. Esses resíduos variam de composição e concentração de nutrientes de acordo com o tipo de atividade, como usinas de cana-de-açúcar, abatedouros, laticínios e entre outros (MUTCHAMUA, 2019).

O lodo se apresenta de uma forma muito diluída, contendo apenas de 0,25 a 12% de sólidos. Além de que o lodo pode conter substâncias inorgânicas e tóxicas,

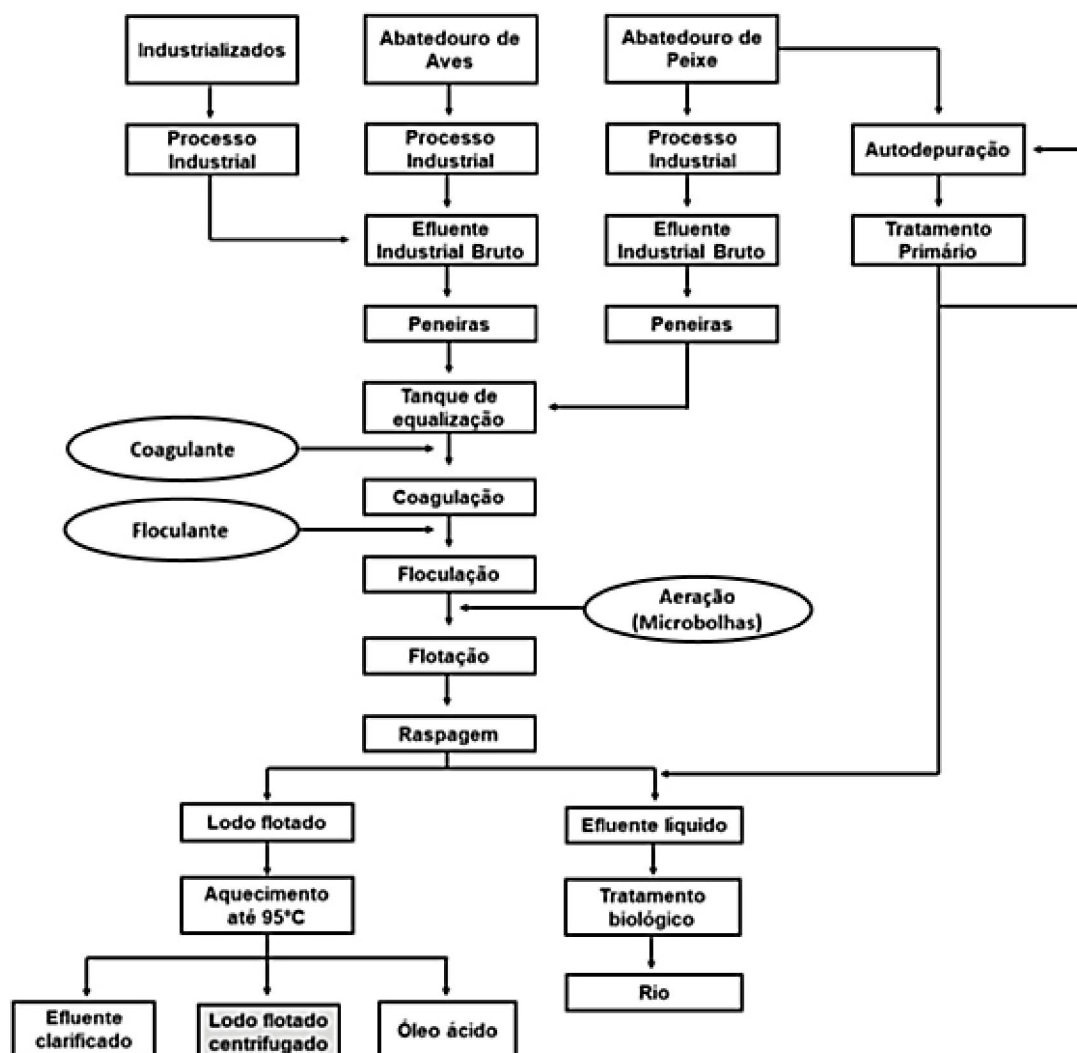
como também microrganismos e patógenos causadores de doenças. Sendo assim, o processamento do lodo visa acabar com essas toxidades para que esse subproduto possa ser descartado ou reutilizado sem causar tantos problemas ambientais. Isso só é alcançado graças aos processos de estabilização, condicionamento e desidratação do lodo (WERTHER *et al.*, 1999).

No processo de estabilização, são apresentados três métodos diferentes praticados em Estação de tratamento de esgoto (ETE), que basicamente são: a digestão, estabilização com cal e tratamento térmico. Na digestão são adicionadas bactérias anaeróbicas ou aeróbicas para produzir um gás e um resíduo estabilizado. A estabilização com cal utiliza-se cal ao lodo para elevar o pH a 12, assim o ambiente se torna desfavorável para criação de microrganismos. Já no tratamento térmico, o lodo é aquecido fazendo com que os sólidos coagulem e quebrem, reduzindo a afinidade da água com o lodo. A desidratação é o processo essencial, no qual facilita o transporte e descarte do lodo tratado. Seu manuseio está direcionado a redução do teor de umidade e, conseqüentemente, ao volume (WERTHER *et al.*, 1999).

Algumas alternativas para a destinação final do lodo são consideradas aceitas. A mais comum é a digestão anaeróbica, seguida pela destinação final em aterros sanitários, depois as lagoas de armazenamentos ou reciclagem agrícola. Outras alternativas apresentam tecnologias de processamento térmico de lodo, como a pirólise, a gaseificação e a combustão (ROSA *et al.*, 2014).

Os tratamentos do lodo gerado são destinados ao processo de centrifugação através da remoção dos sólidos em suspensão. O sistema de tratamento físico-químico inicia-se com o peneiramento do efluente para separação dos materiais grosseiros. Em seguida, o efluente é homogeneizado e o coagulante separa as partículas orgânicas. Posteriormente adiciona-se o floculante, o qual agrupa a matéria em um material mais sólido e assim facilitar o processo de separação. Em seguida, as partículas são flotadas até a superfície com a adição de microbolhas injetadas no fundo do reator. Ao chegar à superfície, pode ser removida por processos físicos convencionais, como raspagem ou sucção, conforme a Figura 7 (MANTOVAN, 2022).

FIGURA 7 - ETAPA DO PROCESSO DE EFLUENTES PARA A PRODUÇÃO DE LODO FLOTADO CENTRIFUGADO



FONTE: Mantovan (2022).

Com a publicação do relatório anual de produção de proteína animal 2022, verificamos que o Brasil produziu cerca de 14,329 milhões de toneladas de carne de frango em 2021. O estado do Paraná foi o maior produtor do país, responsável por cerca 35,54 % do total. Além disso, em 2021 o país conquistou o primeiro lugar entre o mercado mundial de exportação de carne de frango, exportando 4,610 mil toneladas. Ademais, o país conquistou o segundo lugar entre os produtores mais importantes do mundo, ficando atrás somente dos Estados Unidos (ABPA, 2022).

A grande produção está diretamente relacionada com a produção de efluente gerado uma vez que a quantidade de efluente varia entre 20 e 40 L por ave, sendo 25 L um valor típico devido ao uso excessivo de água (FAGNANI *et al.*, 2019).

Se levadas em conta todas as operações realizadas nos abatedouros de aves temos um do efluente diversificado, uma vez que temos água desde a lavagem dos caminhões, operações de abate (da carcaça até as vísceras), processamento de carne e produtos, de higienização de utensílios, equipamentos e do ambiente entre outros (MANTOVAN, 2022)

A produção de peixe de cultivo atingindo 841,005 toneladas de várias espécies, representando 4,7% sobre a produção de 2020. O Brasil é o 4º maior produtor de tilápia do mundo, atingindo 534,005 t, aproximadamente 9,8% a mais que em 2021. No Brasil, a região Sul apresenta a maior produção de tilápia com 86% do total (231,900t), cerca de 43,4% da produção nacional. Nas operações de processamento do peixe a produção de efluente é em torno de 5,4 L kg⁻¹ de peixe processado (ANUARIO, 2022). A alternativa para esta problemática, está na combustão do lodo residual combinado com a biomassa florestal para produção de biocombustíveis alternativos e recurso de energia renovável, devido ao seu potencial energético (PIO *et al.*, 2020).

Com a rápida expansão das cidades e, conseqüentemente, o aumento industrial, aumentou-se também a produção o lodo flotado, resultado do tratamento de efluentes industriais. Uma das alternativas de sua destinação é o aterro, porém esse método causa sérios problemas ambientais. Diante disso, vários estudos vêm sendo desenvolvidos na valorização do lodo como matéria-prima para geração de energia. Na Europa e no Japão, por exemplo, a digestão anaeróbica do lodo é amplamente praticada, reduzindo sua massa e recuperando o biogás. Além disso, a combustão do lodo combinado com biomassa para produção de combustível sólido, como cavacos e *pellets*, também mostra ser uma alternativa benéfica como fonte de energia (HAO *et al.*, 2018; PADILHA *et al.*, 2019).

A resolução da SEMA nº 042/08, estabelece critérios para a queima de resíduos em caldeiras, especificando que em uma mistura de resíduo com um combustível principal o resíduo não deve apresentar uma parcela acima de 20% por peso da mistura ou poder calorífico (SEMA, 2008).

Em um estudo realizado por Fagnani *et al.*, (2019), foi caracterizado o lodo frigorífico de aves e sua queima com cavaco. Na Tabela 3, pode-se verificar os resultados para a análise imediata de nove amostras quanto sua porcentagem de carbono, voláteis, cinzas e poder calorífico superior. Os autores ainda ressaltam que

nas misturas de lodo mais os cavacos, o aumento na porcentagem de lodo resultou num aumento no poder calorífico superior.

TABELA 3 - ANÁLISE APROXIMADA DAS AMOSTRAS DE LODO ADICIONADAS AOS CAVACOS

Amostras (Lodo + cavaco)	Carbono (%)	Voláteis (%)	Cinzas (%)	Poder calorífico superior (kJ kg ⁻¹)
10%	15,06	83,54	1,37	19531
20%	17,72	83,03	2,23	19957
30%	13,42	83,39	3,16	20409
10%	15,27	84,47	1,18	19631
20%	14,04	83,55	1,35	5744
30%	14,99	83,33	1,65	21844
10%	15,40	84,04	0,53	18744
100%	8,61	82,35	9,02	26597
Fagnani	11,17	84,58	4,24	27622

FONTE: Fagnani *et al.* (2019).

A combustão do biocombustível de biomassa, difere das características da combustão do lodo. Em comparação com o lodo, a biomassa possui alto teor de voláteis e baixo teor de cinzas, portanto, a adição de biomassa ao lodo pode alterar o processo e melhorar a eficiência da combustão (XIE *et al.*, 2013).

Meneghini e Proinelli (2015) analisaram as propriedades do lodo frigorífico de aves, como mostra na Tabela 4. O emprego do lodo frigorífico como fonte de energia a partir da co-combustão mostrou-se eficiente, já que obteve um elevado poder calorífico, favorecendo a produção de vapor aliada a redução de consumo do combustível principal. Tornando a alternativa mais eficiente energeticamente e de menor emissão de poluentes.

TABELA 4 - ANÁLISE DO LODO FRIGORIFÍCO

Análise imediata	
Resíduo mineral fixo (cinzas) (%)	17,51
Sólidos voláteis (%)	64,22
Sólidos Totais (%)	81,74
Umidade (%)	12,80
Análise elementar	
Carbono (%)	31,50
Oxigênio (%)	18,60
Hidrogênio (%)	11,50
Nitrogênio (%)	11,50
Enxofre (%)	0,310
Poder Calorífico	
Poder calorífico inferior (kJ kg ⁻¹)	18033
Poder calorífico superior (kJ kg ⁻¹)	20083

FONTE: Meneghini e Proinelli (2015)

As produções de *pellets* a partir do lodo combinado com resíduos agrícolas são satisfatórias em termos de produção de energia, podendo substituir o carvão. Além de ser uma alternativa sustentável e vantajosa com relação ao transporte, carga e descarga (YILMAZ *et al.*, 2018).

Souza *et al.*, (2020) produziu *pellets* de resíduo de poda urbana, lodo e papelão ondulado. Observou que a produção de *pellets* compostos por resíduos de poda urbana e lodo de flotação, em diferentes proporções foi tecnicamente possível. A peletização de resíduos de poda urbana agregando ao papelão ondulado ou embalagens cartonadas em diferentes proporções não foi considerada satisfatória.

Em relação aos *pellets* produzidos com misturas de resíduos de poda urbana e lodo de flotação, a adição de lodo favoreceu a diminuição da umidade e da geração de finos, e o aumento da durabilidade e dureza. O poder calorífico foi reduzido e o teor de cinzas elevado com a adição de lodo. A adição de papelão ondulado em *pellets* compostos por resíduos de poda urbana acarretou a diminuição da densidade, durabilidade e dureza. Essa adição também ocasionou a elevação dos teores de cinzas, porém sem interferência no poder calorífico. As misturas com embalagens cartonadas favoreceram a diminuição da densidade a granel dos *pellets*, bem como da densidade, durabilidade e dureza (SOUZA *et al.*, 2020). Também proporcionou um discreto aumento nos teores de cinzas, porém o poder calorífico também foi levemente aumentado. De modo geral, foi possível a peletização dos diferentes resíduos. No entanto, a classificação de acordo com os padrões da norma europeia (DIN EN 14961-6, 2012), não foi satisfatória, devido à problemas de compactação e características físicas.

Vários experimentos são testados para a provar a eficiência do lodo de lagoa de tratamento para obtenção de combustível sólido. Como retratado em estudo realizado por Jayaraman e Gokalp (2015), na qual realizaram um estudo sobre as características de pirólise, combustão e gaseificação de biomassa e lodo.

2.4 ANÁLISE IMEDIATA DOS MATERIAIS

Para utilização da biomassa como fonte de energia, são consideradas as características físicas e químicas. Isso pode influenciar o rendimento e a manutenção dos equipamentos onde é realizado o processo de combustão. A análise Imediata refere-se a porcentagem, relacionada a massa do material

combustível, fornecendo os resultados dos teores de umidade (TU), teor de voláteis (TV), teor de cinzas (TCZ) e teor de carbono fixo (TCF) (FERREIRA *et al.*, 2014; BIZERRA, 2017). Segundo Vieira (2012), até o ano de 2008 o Brasil não possuía normas para realização destas análises. Neste trabalho os ensaios foram realizados seguindo-se as Normas Brasileiras (presente na Tabela 6, no item Materiais e Métodos desta dissertação).

2.4.1 Teor de Umidade

Bizerra (2017) define TU como porcentagem de água contida na biomassa, expressa tanto na base úmida quanto na base seca. Esse valor é obtido pela diferença entre pesos de uma amostra antes e depois de serem submetidos ao processo de secagem.

O teor de umidade está relacionado com o desempenho térmico do material. Sendo que, quanto maior o TU, menor será o Poder Calorífico (PC). Isso se deve ao fato de que na primeira etapa, de um processo de queima, parte da energia é cedida para ocorrer a evaporação da água. Além disso, o TU, presente na biomassa pode interferir em outras propriedades, como Poder Calorífico Inferior (PCI), intimamente ligado, pois este diminui com o aumento da umidade, e a condutividade elétrica que depende da umidade (VIEIRA, 2012; BIZERRA, 2017).

2.4.2 Teor de Voláteis

O teor de voláteis está relacionado com o comportamento do combustível na decomposição, pois determina a facilidade com que a biomassa queima. Interfere também na ignição, pois quanto maior o TV, maior será a reatividade (BIZERRA, 2017).

O TV é calculado medindo a fração de massa da biomassa que volatiliza durante o aquecimento de uma amostra seca, até temperaturas de aproximadamente 850°C, dependendo do material (VIEIRA, 2012).

2.4.3 Teor de Cinzas

Ainda Vieira (2012), define TCZ como resíduo resultantes da combustão dos componentes orgânicos e oxidantes dos inorgânicos. Bizerra (2017) relata que as cinzas são indesejáveis nos processos de combustão. O elevado TCZ apresenta menos poder calorífico, assim haverá uma maior quantidade de resíduos a serem removidos no processo de combustão.

As cinzas são constituídas majoritariamente de Sílica (Si), Potássio (K), Sódio (Na), Enxofre (S), Cálcio (Ca), Fósforo (P), Magnésio (Mg) e Ferro (Fe) (VIEIRA, 2012).

2.4.4 Teor de Carbono Fixo

Representa a massa restante após a liberação do componente voláteis, excluindo as cinzas e os teores de umidade. O TCF contém a maior parcela de fonte energética na biomassa para a produção de energia durante a combustão. Além de proporcionar uma queima mais lenta - o que aumenta a durabilidade e o rendimento energético – o TCF também define a quantidade de carbono na biomassa (VIEIRA, 2012; BIZERRA, 2017).

2.4.5 Poder Calorífico

Uma das principais propriedades dos combustíveis sólidos, o PC é influenciado pela composição elementar e pela análise imediata. As variáveis como TU e PC, permitem avaliar a aplicabilidade da biomassa como combustível (FERREIRA *et al.*, 2014).

O poder calorífico é uma medida termodinâmica, que representa a quantidade de calor liberada pela combustão completa. Este parâmetro é geralmente dado em termos de energia por unidade de massa ou volume, sendo MJ kg⁻¹ para sólidos, MJ L⁻¹ para líquidos e MJ Nm⁻³ para gases (VIEIRA 2012; BIZERRA, 2017).

Ainda Vieira (2012) e Bizerra (2017) relatam a classificação do PC em duas formas: o Poder Calorífico Superior (PCS), sendo através de bomba calorimétrica, ou por procedimentos ditados pela NBR 8633 (1984). O PCS não leva em consideração as perdas de energia com a evaporação da água presente no combustível. O Poder Calorífico Inferior (PCI) determina a quantidade de calor

liberada durante a combustão, sendo que a água presente nos gases de combustão está em estado de vapor. O PCI é calculado através do PCS, considerando o TU e o teor de hidrogênio presentes no combustível.

Segundo Vieira (2012) *apud* Filho (2009), tanto o PCS e o PCI de uma biomassa, representam a propriedade físico-química mais importante a considerar para um processo termoquímico.

2.5 ANÁLISE QUÍMICA DA BIOMASSA LIGNOCELULÓSICA

Aqui é obtido a porcentagem em massa dos elementos que constituem a fração orgânica de uma amostra. Os principais componentes estruturais da biomassa vegetal são a celulose, lignina e hemicelulose, apresenta também em quantidades minoritárias os extrativos e compostos inorgânicos que englobam os constituintes de baixa massa molar. A concentração da celulose é entre 40 % à 50 %, da hemicelulose de 20 – 40 %, e a lignina é de 25 %, com esta estrutura ela é um vegetal considerado como um resíduo lignocelulósico. A partir da caracterização dos teores de celulose e hemicelulose, se obtém a holocelulose, assim o teor de holocelulose se encontra entre 60 - 90% (JUPPA, 2022).

2.6 ANÁLISE TERMOGRAVIMETRICA (TGA)

Segundo definição do Instituto de Ciência e Tecnologia de Alimentos (ICTA), a análise termogravimétrica é medida a massa de uma substância em função da temperatura, enquanto a substancia é submetida a uma programação controlada de temperatura.

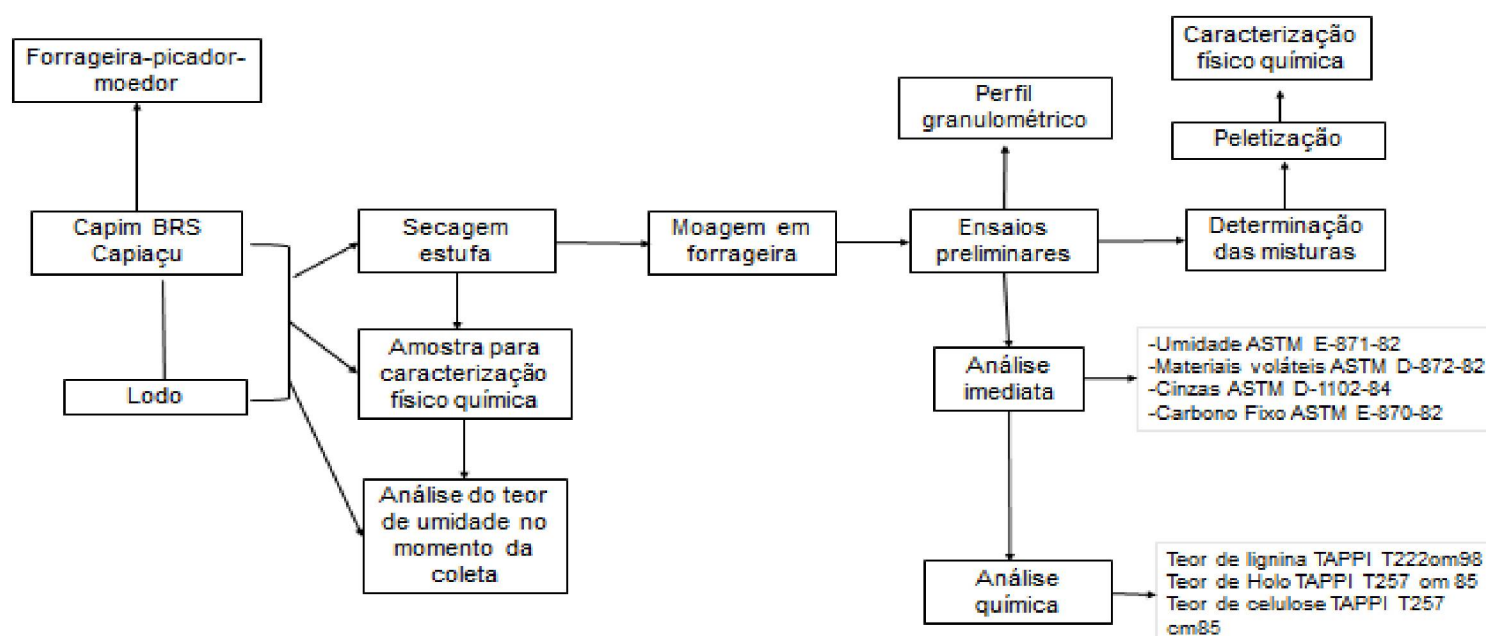
Dessa forma é possível registrar a constante perda de massa devido a variação de temperatura (inicial e final). Tendo em base essa análise é possível interpretar o comportamento do material durante sua composição térmica e fornecer informações sobre as faixas de temperatura de decomposição (ARAÚJO, 2017).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esse trabalho consiste em uma pesquisa quantitativa de caráter descritivo e exploratório, cuja estratégia de investigação é o estudo de caso da produção de *pellets* a partir de biomassa de Capim Elefante BRS Capiaçú e lodo flotado. Os procedimentos experimentais podem ser verificados no fluxograma (Figura 8) e os procedimentos serão descritos na sequência.

Os resíduos foram secados separadamente, assim como moídos e secos em estufas.

FIGURA 8 - FLUXOGRAMA SEGUIDO PARA PRODUÇÃO DE *PELLETS*



FONTE: A autora (2023).

3.1 COLETA DAS AMOSTRAS, PROCESSAMENTO E PELETIZAÇÃO

O lodo flotado coletado na ETE de uma agroindústria na região oeste do Paraná é proveniente do abate de aves, peixes e águas utilizadas na parte interna do complexo, tendo como coagulante cloreto férrico. A coleta do lodo flotado foi

realizada após o processo de centrifugação (tridecânter), separação do efluente clarificado e do óleo ácido (Figura 9).

FIGURA 9 - LODO FLOTADO COLETADO



FONTE: A autora (2023).

O lodo flotado foi coletado e acondicionado em baldes plásticos de 20 L com tampa. Posteriormente levados a UFPR – Setor Palotina, para realização das operações necessárias.

O capim-elefante BRS Capiacu, foi cultivado em uma propriedade rural do município de Palotina – PR de um plantio com seis meses de idade (Figura 10), não irrigado, com espaçamento de 0,6 x 0,6 m. A colheita foi manual realizada a 10 cm do solo.

FIGURA 10 - CAPIM BRS CAPIAÇU PLANTADO



FONTE: A autora (2023).

3.1.1 Teor de umidade no momento da coleta

Para determinação do teor de umidade das amostras, foram adotadas as normativas NBR 9898 (ABNT, 1987) e ASTM E-871-82. Foram retiradas ao acaso aproximadamente 100 g de cada material no lugar onde foi coletado, em pontos diferentes, acondicionados em balde e misturado, de forma que se obteve uma mistura homogênea de cada parte coletada, assim, retirou-se uma parte e guardou-se em saco plástico limpo, para posteriormente envio ao laboratório de Química Orgânica da UFPR - Setor Palotina.

Em um béquer de 100 mL, previamente pesado, adicionou-se aproximadamente 2 g de cada material, e levou-se a estufa, por um período de 24 horas a temperatura de 105 °C. O teor de umidade de cada amostra coletada foi obtido pela diferença entre as massas da amostra, antes e depois de secagem em triplicata.

Importante destacar, o valor do Capim Elefante BRS Capiaçú em base úmida se deu em 62,3 %, próximo ao relatado pela Fagnani (2019), que obteve 65 % de umidade. Em base seca o teor de umidade foi para 6,1 %.

3.1.2 Processamento dos materiais

O lodo flotado foi seco em estufa no Laboratório de Nutrição Animal, UFPR – Setor Palotina, a 80 °C por aproximadamente 24h. Após foi moído no Laboratório de Produção de Biocombustíveis, UFPR – Setor Palotina em forrageira Tramontina de modelo TRF25 de motor 2HP e saída lateral, contendo peneira de abertura 3 mm, na intenção de obter menores partículas.

O capim foi seco em galpão coberto por 15 dias na propriedade onde foi coletado (Figura 11) e triturado em uma forrageira marca Nogueira, modelo EM-4, com motor de 10 cv, na mesma propriedade. Após foi colocado em sacos de rafia e também levado até o Laboratório de Nutrição Animal, UFPR – Setor Palotina para secagem em estufa a 80 °C por aproximadamente 24 horas. Após foi moído na mesma forrageira e condições descritas anteriormente. Ensacado novamente, foi armazenado em um galpão coberto para preparação das misturas.

FIGURA 11 - CAPIM COLETADO E ARMAZENADO EM GALPÃO



FONTE: A autora (2023)

As misturas foram realizadas no Setor Palotina, por revolvimento manual, antes de realizar-se a compactação. Os tratamentos foram identificados de 1 a 7, sendo realizados em triplicata (Tabela 5):

TABELA 5 - TRATAMENTOS COM SUAS RESPECTIVAS PORCENTAGENS

Tratamento	(%) Capim	(%) Lodo
T1	100	0
T2	90	10
T3	80	20
T4	60	40

T5	40	60
T6	20	80
T7	0	100

FONTE: A autora (2023).

3.1.3 Peletização

O material foi compactado na empresa HMbio Energias Renováveis no distrito de Concórdia em Toledo – Paraná. Os *pellets* foram produzidos em uma prensa peletizadora da marca ATX (Figura 12), sendo utilizada matriz de peletização com orifícios de 6 mm de diâmetro. Foram produzidos aproximadamente 20,0 kg de *pellets* para cada tratamento realizado, sendo que os primeiros 10 kg de cada tratamento foram descartados para não haver contaminação de um tratamento com o outros, visto que a peletizadora não pode parar que cada tratamento foi colocado um seguido do outro.

FIGURA 12 - PELETIZADORA UTILIZADA PARA COMPACTAÇÃO DO MATERIAL



FONTE: A autora (2023).

3.2 ANÁLISE DOS PARÂMETROS FÍSICOS E QUÍMICOS

3.2.1 Perfil granulométrico

O perfil granulométrico foi realizado segundo metodologia adaptado de Garcia (2010). Após passar na forrageira foi classificado em peneiras com aberturas 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) e o que passou de 80 mesh. Pesou-se aproximadamente 100g de cada amostra, e colocado na parte superior de um jogo de peneiras de malha, foi agitado por aproximadamente 15 minutos, posteriormente retirando-se o conjunto e pesando as amostras retidas em cada peneira.

3.2.2 Análise química do capim elefante BRS Capiaçú

Na análise química foram analisados os teores de lignina, holocelulose e celulose, realizados conforme as normas presentes na Tabela 6. Todas as análises foram executadas em triplicata no Laboratório de Química Orgânica da UFPR – Setor Palotina.

TABELA 6 - ANÁLISES DOS TEORES DE LIGNINA, CELULOSE E HOLOCELULOSE

Análise	Normas
Teor de lignina	TAPPI T 222 om-98
Teor de holocelulose	TAPPI T 257 om-85
Teor de celulose	TAPPI T 257 cm-85

FONTE: A autora (2023).

O preparo das amostras de capim BRS Capiaçú para as análises consistiu em pesar 1 g de amostra para lignina e 2 g para holocelulose, e em envelopes feitos de papel filtro. Em seguida, foi usado um sistema de extração Soxhlet uma bateria do tipo Sebelin para aquecimento. Faz-se as extrações em etanol/tolueno, 1:2 e, em seguida, em etanol, ambos por um período de 6-8 horas. Após o procedimento os envelopes passaram por 3 lavagens com água fervendo, por 1 hora e posteriormente foram secas em estufa.

3.2.2.1 Determinação do teor de lignina

As análises para determinação do teor lignina foram realizadas conforme a normativa proposta TAPPI T 222 om-98. Em Erlenmeyer de 250 mL, foi pesado aproximadamente 3 g das amostras do envelope de lignina e adicionou-se 15 mL da solução de H₂SO₄ 72 %, e colocados em banho termoestatizado a 18-20 °C durante 1 hora. Em seguida, as amostras foram postas em banho-maria, e mantidas por 1 hora. Passado o período de espera as três amostras foram filtradas separadamente em papel filtro pesado, após o processo do tratamento ácido foram utilizando 500 mL de água destilada para atingir pH neutro, secas em estufa a 105 °C por 24 horas colocadas em dessecador até seu resfriamento e pesadas. A porcentagem do teor lignina foi calculada utilizando a Equação 1.

$$\% \text{ Lignina} = (\text{peso do resíduo} / 1,0000) \times 100 \quad (1)$$

Onde: peso do resíduo = peso total final – tara do cadinho

3.2.2.2 Determinação do teor de holocelulose

As amostras dos envelopes resultantes do preparo inicial foram transferidas para um Erlenmeyer de 125 mL e adicionado 55 mL de água destilada, 3 mL de clorito de sódio (NaClO₂ 20%) e 2 mL de ácido acético (1:5). Em seguida, os erlenmeyers foram colocados em banho termostático a 70 °C e a cada 45 minutos adicionou-se 3 mL de NaClO₂ 20% e 2 mL de ácido acético, totalizando 5 repetições. Após o último tratamento, as amostras foram filtradas com 250 mL de água destilada em papel filtro pesado, secas em estufa a 105 °C por 24 horas, colocadas no dessecador até seu resfriamento e pesadas. O teor de holocelulose foi calculado utilizando a Equação 2.

$$\% \text{ Holocelulose} = (\text{peso do resíduo} / 2,0000) \times 1000 \quad (2)$$

Onde: peso resíduo = peso total final – tara

3.2.2.3 Determinação do teor de celulose

Para o teor de celulose transferiu-se aproximadamente 1 g do material resultante da determinação da holocelulose para um béquer de 100 mL, adicionou-

se 15 mL de hidróxido de potássio a 24 %. Em seguida, colocou-se em agitação por 15 horas, em temperatura ambiente em um shaker a 81 rpm. Após este processo, o material foi filtrado com água destilada até neutralidade; em seguida lavado com ácido acético 1,0 % e por último com etanol em excesso. A celulose obtida foi seca em temperatura ambiente por 48 horas, em seguida em estufa a 105 °C por 30 minutos. Após resfriar-se em dessecador, a celulose foi determinada usando a equação 3.

$$\%celulose = (m_1/m_2) \times 100 \quad (3)$$

Onde:

m_1 = massa de celulose seca

m_2 = massa de holocelulose seca

3.2.3 Análise Imediata

A Análise Imediata foi realizada conforme norma ASTM E-871-82. Foram determinados os teores de umidade (T.U), materiais voláteis (TV), carbono fixo (TCF) e cinzas (TCZ). Todas as análises foram executadas no Laboratório de Química Orgânica e de Controle de Qualidade da UFPR – Setor Palotina, sendo realizadas as análises em triplicatas.

3.2.3.1 Teor de umidade

Pesou-se o cadinho de porcelana com a tampa. Posteriormente, foi adicionado aproximadamente 1 g de amostra e realizou-se a pesagem novamente. Os cadinhos destampados com amostra foram colocados na estufa a 105 °C por 4 horas e após resfriamento em dessecador, pesados. Repetiu-se o procedimento até massa constante.

O teor de umidade do *pellet* foi determinado de acordo com a norma técnica NBR 14660 (ABNT, 2004). Esse valor é adquirido pela diferença entre as massas das amostras, antes e logo após secagem, através da Equação 4:

$$TU = ((m_1 - m_2) / m_2) \times 100 \quad (4)$$

Onde:

TU= teor de umidade da biomassa (%);

m_1 = massa inicial da biomassa em gramas (g);

m_2 = massa final da biomassa (massa seca) em gramas (g).

3.2.3.2 Teor de materiais 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 minutos, um de cada vez, e depois armazenados em dessecador até seu resfriamento.

Após, foram pesadas e assim determinadas o teor de voláteis pela Equação 5:

$$TV = ((m_2 - m_3) / m_2) \times 100 \quad (5)$$

Onde:

TV= teor voláteis (%);

m_2 = massa seca (g);

m_3 = massa final proveniente de mufla (g).

3.2.3.3 Teor de cinzas

Já sem umidade e os voláteis, os cadinhos destampados e suas tampas foram colocados na mufla, sem pré-aquecimento, até atingir a temperatura de 750 °C, sendo mantido por 3 horas, em seguida colocados no dessecador até o seu resfriamento e pesados.

Após a etapa descrita anteriormente, restará apenas as cinzas, resultante da combustão orgânica e oxidação dos inorgânicos. O teor de cinzas é calculado pela seguinte Equação 6:

$$TCZ = (m_3 / m_2) \times 100 \quad (6)$$

Onde:

TCZ = Teor de cinzas (%);

m_2 = massa seca (g)

m_3 = massa das cinzas resultante (g)

3.2.3.4 Teor de carbono fixo

Depois de serem feitas as determinações dos teores de umidade, de material volátil e teor de cinzas, foi determinado o teor de TCF das amostras pela diferença entre os valores de teor voláteis e teor de cinzas, pela Equação 7, a seguir:

$$TCF = (m^2 - m^3 / m^1) \quad (7)$$

Onde:

m^1 = massa amostra seca (g)

m^2 = massa do carbono e cinzas (g)

m^3 = massa das cinzas resultante (g)

TCZ = Teor de cinzas (% b.a.).

3.3 DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR

Os resultados do poder calorífico superior (PCS) foram obtidos utilizando-se a Metodologia ASTM D5865 – 10 (ASTM, 2010), empregando-se uma bomba calorimétrica automática da marca IKA, modelo C5000. A análise foi realizada na Universidade Federal do Paraná (UFPR) – Setor Palotina no Laboratório de Nutrição Animal.

3.4 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA)

Visando avaliar o comportamento de degradação térmica dos resíduos celulósicos, foi empregada a técnica de termogravimetria (TGA). As análises termogravimétricas foram realizadas para todas as matérias-primas e todas as misturas em um analisador térmico simultâneo (STA/TGA) PerkinElmer STA 6000,

com faixa de aquecimento de 30 °C a 700 °C a uma razão de aquecimento de 10 °C min⁻¹ em um fluxo de gás de 20 mL min⁻¹, avaliando-se em atmosfera de ar sintético.

Após a análise, os dados foram submetidos ao programa Origin 8.5 (OriginLab, 2010) para plotagem dos gráficos.

3.5 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE

Para determinação da densidade aparente, a granel e energética utilizou-se as normas apresentadas na Tabela 7.

TABELA 7 - ANÁLISES E REFERENCIAS PARA CARACTERIZAÇÕES DOS *PELLETS* JÁ PRODUZIDOS

Análises	Normas
Densidade Aparente	ONORM M7135
Densidade a granel	NBR 17013-1 (2022)
Densidade energética	Garcia (2010)

FONTE: A autora (2023).

Para determinação da densidade completou-se com *pellets* um cilindro metálico de 5000 mL de volume, em seguida pesou-se em balança semi - analítica com precisão de 0,01 g, fazendo assim a relação entre a massa e o volume, e determinou a densidade a granel/aparente (D1) (kg m⁻³).

Pegou-se, 40 unidades de *pellets* e com um paquímetro determinou-se as medidas das circunferências, e através da Equação (8). É possível obter o volume das amostras, e para os resultados das densidades aparente e a granel, foi realizado através da Equação (9).

$$v = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (8)$$

$$D1 = m/v \quad (9)$$

Onde:

r= raio (m);

h= altura(m);

v= volume(m⁻³);

D1= densidade a granel/aparente (kg m⁻³);

m= massa (kg).

E a densidade energética foi calculada multiplicando os valores do poder calorífico superior pelos valores de densidade a granel, utilizando a Equação (10).

$$D2=PCS \times D1 \quad (10)$$

Onde:

D2= densidade energética (MJ m^{-3});

PCS= poder calorífico (MJ kg^{-1});

D1= densidade aparente/ a granel (kg m^{-3}).

3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para as variáveis umidade, carbono fixo, materiais voláteis e teor de cinzas, bem como poder calorífico superior dos *pellets*, foram avaliadas por meio da análise de variância, por metodologia de quadrados mínimos, considerando significância ao nível de 5% de probabilidade ($P < 0,05$).

Para as variáveis quantitativas, foi realizada a análise de regressão polinomial considerando significância ao nível de 5 % de probabilidade ($P < 0,05$). Estimando as equações quando significativo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A produção de *pellets* de qualidade, se dá em dois segmentos de acordo com a *Bioenergy Europe*, que são os segmentos residencial/comercial e o segmento industrial responsável pelo consumo de 55 % e 45 % dos *pellets* produzidos na Europa. No segmento residencial/comercial os *pellets* se caracterizam pela

qualidade *premium*, através do pinho, já que aplicabilidade é de pequena escala. O segmento industrial é caracterizado pelo consumo de *pellets* de qualidade inferior, constituído por biomassa lenhosa, como pinus e eucalipto. Este último satisfaz as necessidades do consumo das centrais elétricas e termoelétricas, que utiliza os *pellets* para combustão, afim de diminuir a emissão de gases do efeito estufa (NASCIMENTO, 2020).

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DAS AMOSTRAS

Na empresa, a coleta do lodo ocorreu após passar pela centrífuga tridecânter e apresentou teor de umidade no momento da coleta de 62,3%. Esse teor de umidade foi próximo ao relatado por Fagnani *et al.* (2019), que obteve 65% de umidade. Já Mantovan (2022) que analisou os três turnos de operação agroindustrial, obteve teores de umidade de 61,70 %, 64,70 % e 68,66 % respectivamente. Os altos índices de umidade podem intervir no processo de combustão e retardar a liberação de voláteis, sendo assim, uma alternativa para maior aproveitamento energético consiste na secagem desse resíduo, reduzindo a umidade para 15 – 20 % (SENA *et al.*, 2008; VIRMOND *et al.*, 2011; PADILHA *et al.*, 2019).

Em relação ao capim que foi coletado, o mesmo apresentou 64,2 % de teor de umidade no momento da coleta, sendo similar ao verificado por Marafon *et al.* (2017), que foi de 65,1 % para o capim elefante (*Pennisetum purpureum*). Almeida (2019) analisou o capim elefante verde e obteve 63 % de umidade, e Juppa (2022) obteve 64,79 % para o capim elefante BRS Kurumi. De acordo com alguns autores, umidade elevada prejudica a queima da biomassa, reduzindo o poder calorífico e, conseqüentemente, é um fator limitante na qualidade da combustão (BRAND, 2010; MAGALHÃES *et al.*, 2016). Sendo assim, o indicado é que se optem por materiais com umidade inferior a 50 % para que tenham quantidade de calor suficiente liberada (KLAUTAU, 2008), por isso, alguns materiais para serem utilizados para a combustão passam por secagem prévia quando necessário.

O lodo flotado e o capim apresentam teores de umidade no momento da coleta elevados, necessitando de secagem previa para moagem. A remoção da umidade, mediante secagem ao sol, uso de secadores e o adensamento da biomassa para produção de combustíveis sólidos (*pellets* e briquetes), são

estratégias essenciais para melhorar a eficiência energética no uso destes materiais (MARAFON; SANTIAGO, 2015).

Após a moagem dos materiais, estes foram submetidos a determinação do perfil granulométrico (Tabela 8), onde o lodo apresentou maior porcentagem retida na peneira de 20 mesh (0,871 mm) (54,60 %), 35 mesh (0,50 mm) (13,97 %), 70 mesh (0,25 mm) (8,14 %) e 80 mesh (0,177) (2,95 %), do que o Capiáçu.

TABELA 8. PERFIL GRANULOMÉTRICO DAS AMOSTRAS DE LODO E CAPIÁÇU.

Peneira (mesh)	Massa da amostra (g)	
	Lodo=100,0252g	Capiáçu=100,33g
20	54,6 %	50,0 %
35	13,9 %	12,8 %
45	13,9 %	18,9 %
70	8,1 %	6,1 %
80	2,9 %	2,1 %
> 80	4,7 %	8,1 %
Total	98,1 %	98,0 %

FONTE: A autora (2023)

Analisando a Tabela 8, foram pesados aproximadamente 100 g de cada material para peneiração, afim de identificar a quantidade em gramas distribuída em cada peneira. Na peneira de 20 mesh (0,871 mm) ficou retida a maior quantidade de material tanto para o lodo como para o capim, 54,6 % e 50,0 %, respectivamente. Enquanto que a porção mais fina da peneira (<0,177mm) apresentou quantidades menores. Para ambos os materiais ocorreram perdas em torno de 2 % referentes as operações de pesagem.

Estudos apontam que a condição ideal é a presença de partículas de diferentes tamanhos, melhorando assim o empacotamento das partículas e promovendo alta resistência dos *pellets* (DIAS *et al.*; 2012). Dias *et al.*; (2012) ainda destaca que se a distribuição for ampla de tamanho de partículas, promove a incorporação das partículas pequenas pelas partículas de maior dimensão. Porém, partículas muito finas, com tamanho inferior a 1 mm, são inadequadas para uma extrusora de rosca, porque são menos densas, mais coesas e pouco fluídas. Com exceção dos materiais que possuem pequeno tamanho de partícula, como serragem e casca de arroz, todos os outros materiais devem ser reduzidos a 6 - 8 mm de tamanho com cerca de 10 - 20 % de finos para se obter bons resultados de peletização (DIAS *et al.*; 2012).

4.2 AVALIAÇÃO QUALITATIVA DOS *PELLETS*

A seguir são apresentados os *pellets* produzidos (Figuras 13 a 19). Os *pellets* saíam quentes, pelo atrito da compactação, alguns quebradiços e com fraturas. Pode-se verificar que T1 e T7 apresentaram aspecto de agregação das partículas com pouca deformidade.

Nota-se que para o primeiro tratamento, T1 (Figura 13), os *pellets* compostos por 100 % Capiáçu, apresentam um aspecto físico de melhor agregação das partículas, bem compactados, com brilho e nenhuma fratura, visto que isso foi possível pelo fato de serem peletizados com apenas um material.

FIGURA 13 - *PELLETS* COM 100 % CAPIAÇU E 0 % DE LODO (TRATAMENTO 1)



FONTE: A autora (2023)

Diferente do T1, os *pellets* compostos por 90 % Capiáçu e 10 % lodo (T2), apresentaram diâmetros menores e com fraturas, não sendo tão compactos e mais quebradiços.

FIGURA 14 - *PELLETS* COM 90 % CAPIAÇU E 10 % LODO (TRATAMENTO 2)



FONTE: A autora (2023)

Os *pellets* T3 (Figura 15) e T4 (Figura 16), apresentaram várias variações de tamanho e diâmetro, nota-se alguns mais grossos e outros mais finos.

FIGURA 15 - *PELLETS* COM 80 % CAPIAÇU E 20 % LODO (TRATAMENTO 3)



FONTE: A autora (2023)

FIGURA 16 - *PELLETS* COM 60 % CAPIAÇU E 40 % LODO (TRATAMENTO 4)



FONTE: A autora (2022)

Já os *pellets* T5 (Figura 17) foram os que apresentaram os piores resultados quanto a sua estrutura físicas, apresentando-se bem mais quebradiços em relação aos outros com fraturas e tamanhos menores, além de serem os mais frágeis.

FIGURA 17 - *PELLETS* COM 40 % CAPIAÇU 60 % LODO (TRATAMENTO 5)



FONTE: A autora (2023)

Os *pellets* T6 também apresentaram vários tamanhos. Neste caso foi possível observar que com adição de lodo os *pellets* se tornam menos quebradiços em comparação aos tratamentos T3, T4 e T5.

FIGURA 18 - *PELLETS* COM 20 % CAPIAÇU E 80 % LODO (TRATAMENTO 6)



FONTE: A autora (2023)

Em relação aos *pellets* formados por 100 % lodo (T7), estes se mostram mais compactados e firmes, assim como o T1, visto que esses são compostos apenas por um único material.

FIGURA 19 - PELLETS COM 100 % LODO (TRATAMENTO 7)



FONTE: A autora (2023)

4.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E ENERGÉTICA DAS MATÉRIAS-PRIMAS E DOS PELLETS PRODUZIDOS

Na Tabela 9 são apresentados os resultados para os teores de celulose, hemicelulose e lignina, juntamente com os resultados obtidos da literatura (LESSA, 2019; JUPPA, 2022), que evidenciam os resultados das principais cultivares do capim elefante. O intuito foi comparar os diferentes capins.

TABELA 9 - RESULTADO DA CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA PARA O CAPIM BRS CAPIAÇU E COMPARAÇÃO COM DADOS DA LITERATURA.

Amostra	% Lignina	% Holocelulose	% Celulose	Autor
BRS Capiaçú	10,73	59,94	41,80	A autora (2023)
cv. Kurumi	4,89	58,59	46,66	Juppa (2022)
cv. Mott	5,49	-	27,74	Lessa (2019)
cv. Capiaçú	11,23	-	34,85	Lessa (2019)
cv. Roxo	6,70	-	37,33	Lessa (2019)

FONTE: A autora (2023).

Na caracterização química dos capins capiaçu, tanto neste estudo, quanto no de Lessa (2019) as porcentagens de lignina são maiores que de outras variedades estudadas. A porcentagem de celulose aferida neste estudo para

capiaçu foi maior (41,8 %) que a obtida por Lessa (2019) (34,85 %), e menor que a obtida por Juppa (2022) para o Kurumi (46,66 %). A celulose e a hemicelulose tendem a se decompor em produtos voláteis, enquanto que quanto maior o teor de lignina, maior tendência à formação de produto sólido, como rendimento de carvão (KAN *et al.*, 2016).

Quando comparado com as madeiras de eucalipto e pinus, estas quantidades de componentes estruturais variam, principalmente em relação a quantidade de lignina presente. Rodrigues (2009), obteve resultados para a celulose entre 40 – 45 %, hemicelulose 7 – 14 % e lignina de 26 – 34 %, e para as folhosas: a celulose entre 38 – 49 %, hemicelulose de 19 – 26 % e lignina de 23 – 30 %. Brumano (2015) em seu estudo avaliou a lignina para serragem de eucalipto obtendo teor de lignina total de 28,2 % e para serragem de pinus de 31,1 %, sendo valores superiores aqueles encontrados em gramíneas.

4.3.1 Análise imediata

As características dos materiais utilizados na produção dos *pellets* influenciarão nos teores de umidade, materiais voláteis, carbono fixo e cinzas do produto final. Antes da compactação, o lodo e o capim, foram submetidos a análise imediata (Tabela 10). Verificou-se que o capim e o lodo após a preparação para a análise imediata apresentaram teores de umidade em torno de 6 % e que o lodo apresentou teores de carbono fixo e cinzas inferiores ao capim, 7,59 % e 4,28 %, respectivamente. Enquanto que o teor de voláteis foi superior para o lodo, 85,65 %.

TABELA 10 - ANÁLISE IMEDIATA ANTES DO PROCESSO DE PELETIZAÇÃO

Amostra (%)	Umidade (%)	Carbono Fixo (%)	Voláteis (%)	Cinzas (%)
Capim	6,1	20,7	69,9	9,0
Lodo	6,7	7,5	85,6	4,2

FONTE: A autora (2023).

Após o processo de peletização obteve-se para os tratamentos os seguintes resultados para a análise imediata dos *pellets* (Tabela 11).

TABELA 11 – ANÁLISE IMEDIATA DOS TEORES DE UMIDADE, CARBONO, VOLÁTEIS E CINZAS PARA OS *PELLETS*.

Amostras	Umidade (%)	Carbono Fixo (%)	Voláteis (%)	Cinzas (%)
T1	10,2 ± 0,1	19,4 ± 1,3	69,1 ± 1,5	11,3 ± 0,2
T2	9,8 ± 0,1	14,8 ± 6,1	74,1 ± 6,4	11,0 ± 0,4
T3	8,7 ± 0,1	15,7 ± 1,3	74,5 ± 1,1	9,7 ± 0,2
T4	8,4 ± 0,1	12,6 ± 0,5	77,6 ± 0,6	9,6 ± 0,2
T5	9,9 ± 1,5	9,5 ± 0,5	80,5 ± 0,9	9,9 ± 0,4
T6	7,8 ± 8,1	6,1 ± 0,5	84,9 ± 0,5	8,9 ± 0,1
T7	4,2 ± 0,1	6,7 ± 0,3	85,6 ± 0,5	7,5 ± 0,1

FONTE: A autora (2022).

Observa-se que a adição de lodo flotado ao capim BRS Capiaçú promoveu um aumento no teor de voláteis e diminuição nos teores de carbono fixo e cinzas, como esperado de acordo com os resultados da caracterização química encontrados para esses dois materiais (Tabela 9).

4.3.2 Densidade e energia

A densidade a granel é importante para quantificar os volumes de produtos com formas irregulares, já que considera os espaços vazios (GARCIA; CARASCHI; VENTORIM, 2013). Já segundo Oliveira (2016), a densidade aparente refere-se a massa média do sólido granulado por volume, não considerando os espaços vazios entre os grânulos. A média da densidade a granel e aparente dos *pellets* produzidos são apresentadas na Tabela 12.

TABELA 12 – PODER CALORÍFICO SUPERIOR, DENSIDADES A GRANEL E APARENTE, DENSIDADES ENERGÉTICAS A GRANEL E APARENTE DOS *PELLETS*

Amostras	PCS (MJ g ⁻¹)	Densidade a granel (kg m ⁻³)	Densidade aparente (kg m ⁻³)	Densidade energética a granel (GJ m ⁻³)	Densidade energética aparente (GJ m ⁻³)
T1	15,1 ± 0,1	631,4 ± 10,8	1209 ± 122,9	9,5	18,3
T2	16,3 ± 0,1	593,8 ± 10,2	1043 ± 171,4	9,7	17,0
T3	16,4 ± 0,1	544,8 ± 5,0	1063 ± 177,3	9,0	17,5
T4	20,1 ± 0,2	512,2 ± 2,5	957 ± 109,6	10,3	19,3
T5	21,1 ± 0,2	573,8 ± 4,8	930 ± 104,4	12,1	19,7
T6	22,6 ± 0,1	403,6 ± 7,2	1098 ± 163,4	9,2	24,9
T7	24,9 ± 0,1	473 ± 5,7	870 ± 111,2	11,8	21,7

FONTE: A autora (2023).

A densidade a granel das amostras variou de 403,6 a 631,4 kg m⁻³ nos tratamentos T1 a T7. Verifica-se que a adição de lodo ocasionou uma diminuição na

densidade a granel dos *pellets* e por consequência diminuição da densidade energética.

Já a densidade aparente das amostras variou de 870 a 1209 kg m⁻³ nos tratamentos T1 a T7, sendo a maior densidade aparente observada no tratamento 1, com *pellets* compostos por 100 % de capim e a menor no tratamento T7, de *pellets* compostos por 100 % de lodo flotado.

Os *pellets* produzidos neste estudo apresentaram valores de densidade semelhantes aos encontrados na literatura (Tabela 13).

A densidade energética indica o potencial da biomassa em termos energéticos por unidade de volume. Baixas densidades a granel inviabilizam o transporte a maiores distâncias por ocupar grandes volumes. A compactação traz vantagens relacionadas ao volume e poder calorífico. *Pellets* com maior densidade energética liberam, durante a sua queima, maior quantidade de energia por unidade volumétrica (MAGALHÃES *et al.*, 2016).

TABELA 13 - DENSIDADE A GRANEL E ENERGÉTICA CITADAS NA LITERATURA PARA PELLETS.

Referências	Material	Umidade (%)	Densidade a granel (kg m ⁻³)	Densidade energética a granel (GJ m ⁻³)
Magalhães <i>et al.</i> (2016)	Capim-elefante (<i>Pennisetum purpureum</i>)	12	588,4	8,69
Carvalho <i>et al.</i> (2017)	Capim-elefante (<i>Pennisetum purpureum</i>)	12,79	709,0	10,17
Rodrigues (2021)	Lodo primário gerado na indústria de celulose <i>kraft</i>	13,6	551	-
Almeida (2020)	50% capim-elefante + 50% de lodo de ETE	12,12	704,9	10,36
Almeida (2020)	75% de capim-elefante + 25% de lodo de ETE	10,44	621,87	10,27

FONTE: A autora (2023).

Para a análise da densidade a granel, a Norma europeia para *pellets* não lenhosos, a EN 14961-6 (ESN, 2012), cita que tanto para *pellets* tipo A quanto tipo B, o valor mínimo de 600 kg m⁻³. Dessa forma, a peletização neste estudo das matérias isolados e das misturas foi eficaz em termos de diminuir significativamente

o volume, viabilizando o transporte a longas distâncias desse material e atendeu os pressupostos normativos europeus.

4.3.3 Apresentação da análise termogravimétrica (TGA)

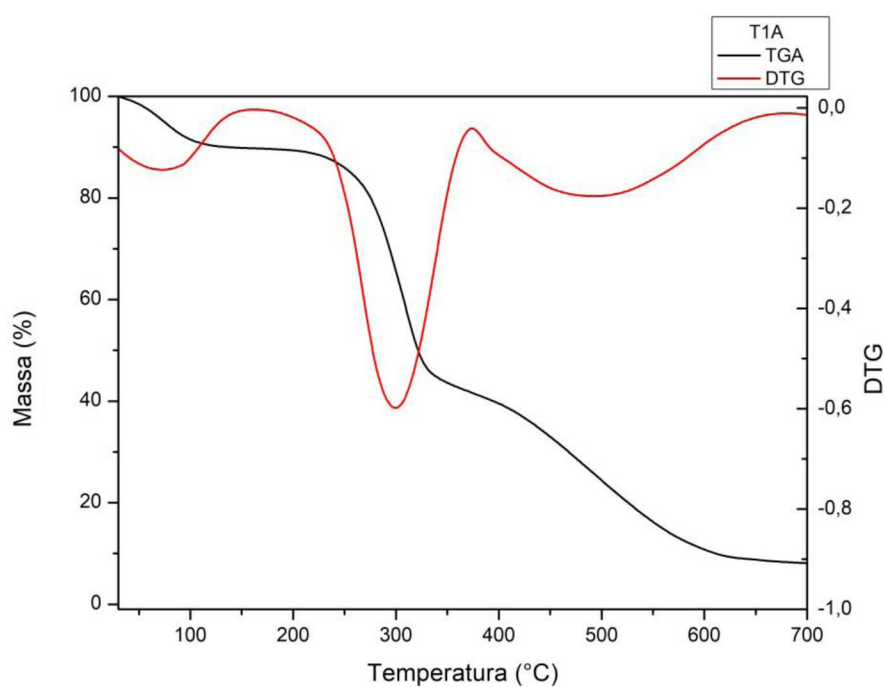
A análise termogravimétrica representa a degradação de massa em função da temperatura. Na Tabela 14 é apresentado um resumo dos eventos observados nos termogramas dos *pellets* (Figuras 20 a 25) e da amostra de lodo (Figura 26).

TABELA 14 - RELAÇÃO DOS EVENTOS OBSERVADOS NOS TERMOGRAMAS

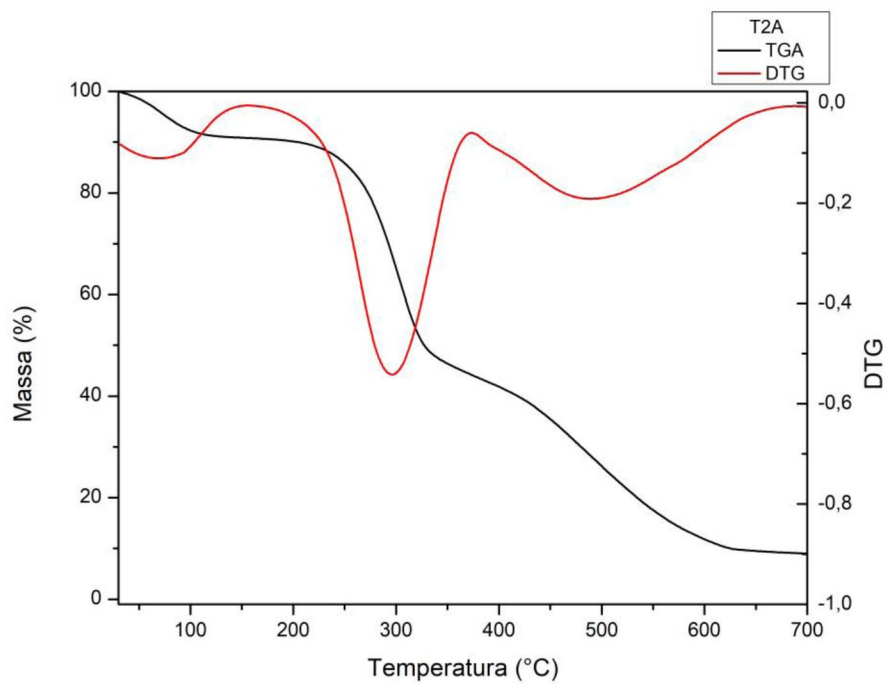
Tratamento	Primeiro Evento (°C)	Segundo Evento (°C)	Terceiro Evento (°C)
T1	90 - 110	250 - 300	390 - 700
T2	90 - 110	200 - 300	400 - 700
T3	90 - 110	200 - 300	400 - 700
T4	90 - 110	200 - 300	550 - 700
T5	90 - 110	200 - 300	400 - 700
T6	90 - 100	110 - 200	550 - 700
T7	90 - 110	200 - 250	550 - 700

FONTE: A autora (2023).

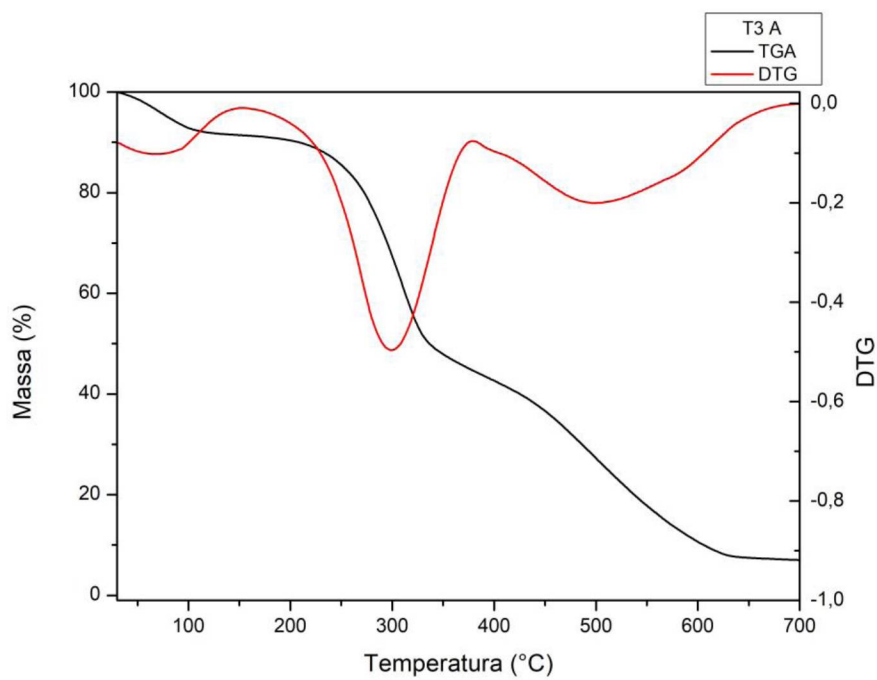
FIGURA 20 - ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA *PELLET* T1



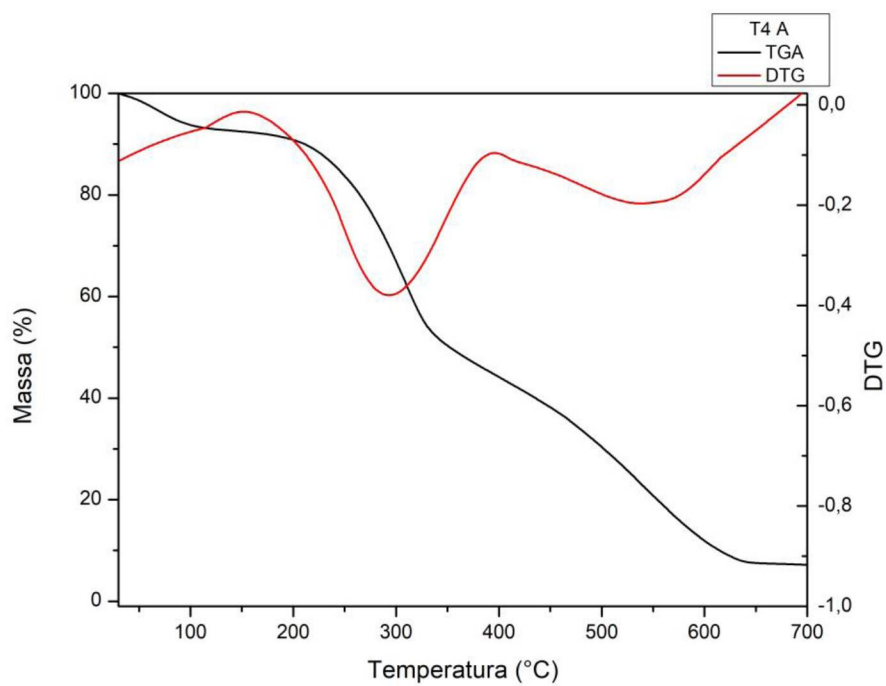
FONTE: A autora (2023).

FIGURA 21 - ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA *PELLET* T2

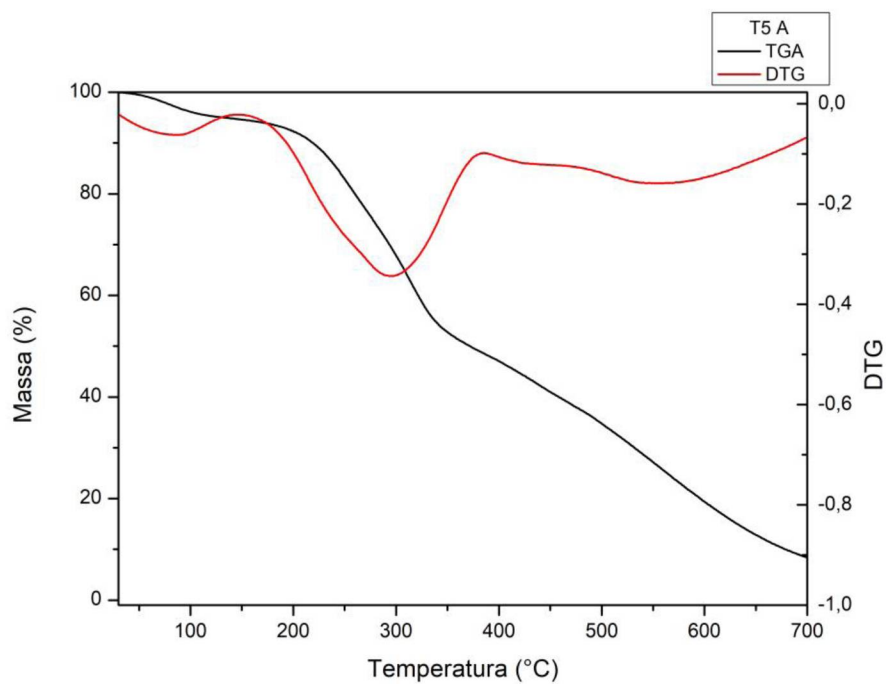
FONTE: A autora (2023).

FIGURA 22 - ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA *PELLET* T3

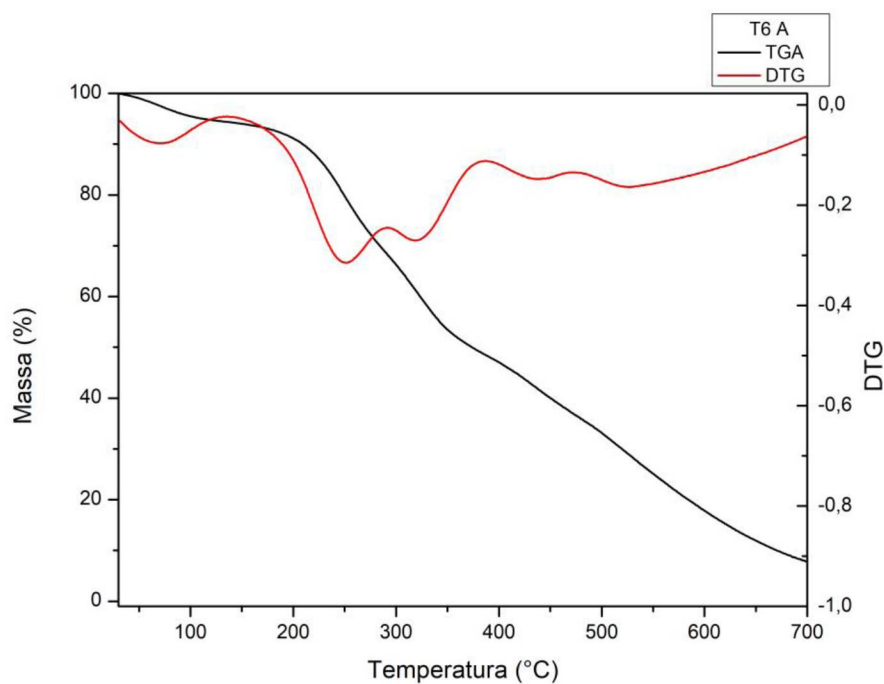
FONTE: A autora (2023).

FIGURA 23 - ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA *PELLET* T4

FONTE: A autora (2023).

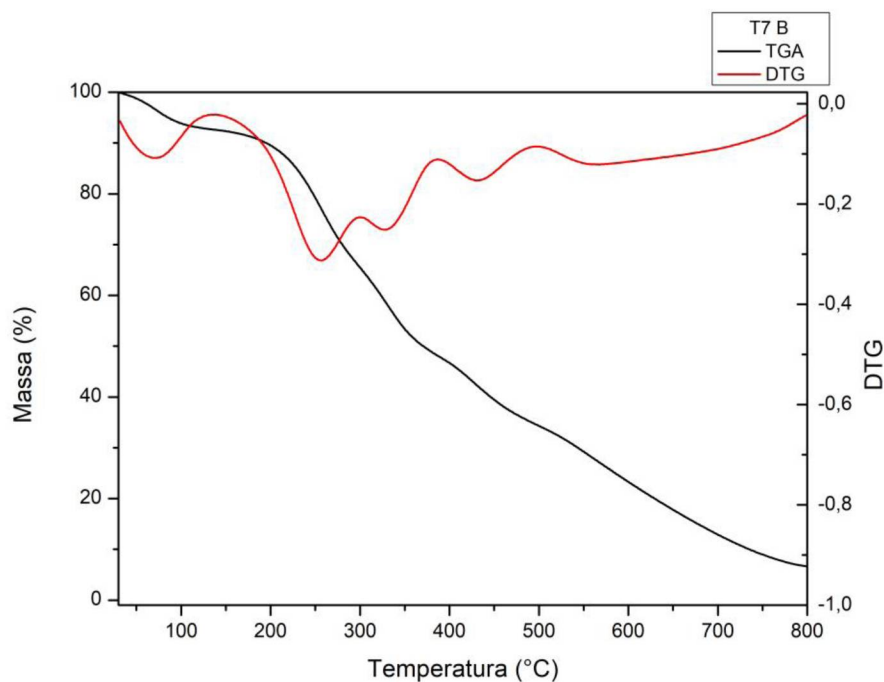
FIGURA 24 - ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA *PELLET* T5

FONTE: A autora (2023).

FIGURA 25 - ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA *PELLET* T6

FONTE: A autora (2023).

FIGURA 26 - ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DA AMOSTRA LODO



FONTE: A autora (2023).

As análises termogravimétricas (TGA) e sua derivada (DTG) são as técnicas mais utilizadas para verificar os eventos térmicos durante a pirólise de amostras de

diferentes materiais combustíveis e compará-los, medindo as variações de massa durante o aquecimento. Esta técnica permite interpretar o comportamento dos *pellets* durante a sua decomposição, determinar a estabilidade térmica do material, além de fornecer informações de quais faixas de temperatura são mais pronunciadas. Essas técnicas têm sido amplamente utilizadas para o estudo da decomposição da madeira e seus principais componentes como a celulose, as hemiceluloses e a lignina. Os termogramas geralmente mostram três estágios de decomposição: o primeiro é atribuído à evaporação da água e dos materiais voláteis; o segundo, refere-se à decomposição da holocelulose na pirólise ativa; e o terceiro, atribuído a decomposição da lignina na pirólise passiva (GARCIA; CARASCHI; VENTORIM, 2016), como explicado a seguir para os *pellets* produzidos neste estudo.

Para todos os termogramas o evento próximo a 100 °C refere-se à perda de umidade do material. Na figura 20 é possível observar, três eventos, conforme também observado por Kataria *et al.* (2017) para Capim Elefante (*Miscanthus giganteus*) e Godinho (2018) para capim elefante (*Pennisetum purpureum*). No primeiro evento em torno 90 - 100 °C temos a perda de água da amostra, que em materiais lignocelulósicos está contida na celulose e devido as características hidrofílicas. No segundo evento temos a pirólise da celulose, e Godinho (2018) sugere que nesta etapa a lignina possui uma alta resistência à pirólise, e funciona como um retardante à oxidação devido à estabilidade conferida pelos diversos grupos de aromáticos na molécula, fazendo com que a fibra bruta tenha uma menor degradação de celulose. O terceiro evento é referido a pirólise da lignina.

Nas figuras 20 – 22 percebe-se o mesmo padrão de eventos nos termogramas, onde em T2 e T3 a incorporação de lodo foi apenas 20 e 40 %, com maior quantidade de capim (80 e 60 %, respectivamente), mantendo portanto, característica do material lignocelulósico na degradação.

A hemicelulose é degradada principalmente entre 150 - 275 °C (OLIVEIRA *et al.*, 2010; FIGUEROA *et al.*, 2009). Elas podem apresentar um tipo de açúcar na cadeia principal (homopolissacarídicas) ou mais que um tipo em sua cadeia básica (heteropolissacarídicas) (EBRINGEROVA, 2006), que implica no grau de polimerização (até 200 unidades), cadeias curtas, baixo peso molecular e ramificações. Já a celulose é degradada principalmente entre 275 - 400 °C (OLIVEIRA *et al.*, 2010; FIGUEROA *et al.*, 2009). Diferentemente da hemicelulose, a

celulose apresenta alto peso molecular, cadeia principal homopolissacarídica, grau de polimerização de até 25.000 unidades, com conformação organizacional estável, devido às ligações de hidrogênio resultando em regiões ordenadas. Essas diferenças estruturais entre a celulose e a hemicelulose são responsáveis pela degradação da hemicelulose, primeiramente, seguida da celulose (JUNIOR *et al.*, 2014).

Nas figuras 23 e 24, respectivamente 60 e 80 % de incorporação de lodo percebe-se um padrão de semelhante à figura 26, referente ao termograma do lodo.

Pasquini (2014) observou para quatro amostras de lodo (galvanoplastia, têxtil, esgoto e frigorífico) que a combustão se processou em três etapas que ocorreram simultaneamente. A primeira foi a evaporação da umidade, a segunda a pirólise do material e a queima dos compostos voláteis e a terceira a queima do carbono fixo (FACCINI, 2012). Na primeira fase ocorreu a fase endotérmica, a evaporação da água; na segunda fase ocorreu a formação de chamas pelos gases, ao ser atingida a temperatura mínima para a liberação dos gases e na terceira e última fase ocorreu a queima do carbono fixo. O mesmo perfil ocorreu também nos trabalhos de Macedo (2006) e Fonts *et al.*, (2012). De acordo com os mesmos, até uma temperatura de 160 °C ocorrem eventos de desidratação; entre 170 a 660 °C ocorrem três estágios distintos: 1) devido a decomposição de pequena fração de amostra, de material biodegradável com cadeia molecular curta e compostos semivoláteis (entre 160 e 350 °C); 2) devido a decomposição de uma fração maior, intermediária, de polímeros orgânicos presentes, oriundos da estabilização (oxidação bioquímica) do lodo, ou polímeros provenientes do lodo gerado no processo de tratamento (entre 350 e 450 – 500 °C); 3) devido a decomposição de outra fração pequena de material de difícil biodegradabilidade, como celulose ou similares (entre 500 e 660 °C). Entretanto, é difícil identificar exatamente onde os estágios iniciam e terminam, sendo necessário a análise do comportamento térmico por patamares menores, dentro desses intervalos; já acima de 660°C ocorre, principalmente, a oxidação das cinzas e consequente redução de materiais inorgânicos.

Nas tabelas termogravimétricas, observa-se variáveis curvas conforme o aumento da temperatura. O mais comum em acontecer é a perda de massa devido aos processos que ocorrem, processos estes que são: a decomposição, ocorre medida que a temperatura vai aumentando, neste caso ocorre perda da massa; a oxidação, onde neste caso se pegamos um metal (por exemplo Fe), em atmosfera

de oxigênio, esse oxigênio pode ser incorporado a amostra aumentando sua massa, por isso ocorre curvas com aumento de massa; a deserção, onde ocorre a saída de gases, ou seja, perda de massa novamente; a vaporização que também ocorre perda de massa; e por último a fusão, entretanto nesta ocorre do estágio sólido para líquido, portanto a variação de massa é zero.

4.4 ANALISE ESTATÍSTICA

As variáveis umidade, carbono fixo, materiais voláteis e teor de cinzas, bem como poder calorífico superior dos *pellets*, foram avaliadas por meio da análise de variância, por metodologia de quadrados mínimos, considerando significância ao nível de 5 % de probabilidade ($P < 0,05$). Sendo que, para as variáveis quantitativas, foi realizada a análise de regressão polinomial considerando significância ao nível de 5 % de probabilidade ($P < 0,05$). A regressão é uma técnica que tem como resultado uma equação matemática capaz de descrever, da melhor forma, o relacionamento entre as variáveis (dependentes e independentes).

Sendo assim, na tabela 15 encontra-se a análise de regressão para os *pellets* quanto a adição de lodo flotado ao capim BRS capiaçu. A partir das equações é possível verificar dentro de uma porcentagem de 0 – 100 % de lodo na composição final dos *pellets*, qual o valor de uma determinada variável (umidade, cinzas, carbono fixo, materiais voláteis e PCS) em função da porcentagem utilizada. Obteve-se uma função cúbica para U, quadrática para CF e linear para CZ, MV e PCS. Neste sentido é possível escolher a porcentagem a ser utilizada e verificar qual será o valor da variável (dependente ou independente). Para MV e PCS os valores aumentam com o aumento da porcentagem de lodo adicionado, efeito oposto é observado para U, CZ e CF que diminuem com a adição de lodo.

TABELA 15 - ANÁLISE DE REGRESSÃO PARA O PELLET QUANTO A ADIÇÃO DE LODO FLOTADO.

Para adição de lodo flotado			
Variável	Equação	R ²	P < 0,0001
Umidade	$U = 13,502126 - 0,330918 L + 0,006589 L^2 - 0,000042 L^3$	0,967458	0,0360
Cinzas	$CZ = 10,292731 - 0,020751 L$	0,501315	0,0001
Carbono Fixo	$CF = 20,764762 - 0,265073 L + 0,001182 L^2$	0,982998	0,0333
Materiais	$MV = 70,352634 + 0,16970536 L$	0,96508	0,0001

Voláteis PCS	$PCS = 15,628 + 0,09266 L$	0,988059	0,0001
-------------------------	----------------------------	----------	--------

FONTE: A autora (2023). NOTA: L = Porcentagem de lodo flotado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em relação aos resultados da análise imediata (U, MV, CF e CZ) das biomassas (lodo flotado e capim elefante BRS Capiáçu) e dos *pellets* produzidos, os valores são condizentes com os apresentados na literatura. A adição de lodo a biomassa de capim resultou em um aumento do teor de materiais voláteis, diminuição nos teores de umidade, carbono fixo e cinzas.

Os *pellets* produzidos a partir de 100 % de capim elefante BRS Capiáçu (T1) e 100 % lodo de flotado (T7) mostraram boa agregação das partículas afinal são constituídos de um único material.

Em relação as misturas os *pellets* T5 (40% de Capim elefante BRS Capiáçu e 60% lodo flotado) foram os que apresentaram os piores resultados quanto a sua estrutura físicas, foram os mais quebradiços, frágeis e com tamanhos menores. Os *pellets* de T4 (60% de Capim elefante BRS Capiáçu e 40% lodo flotado) mostraram melhor agregação das partículas, mesmo ultrapassando o especificado na Resolução SEMA nº 042/08, que prevê o máximo de 20 % de resíduo para queima em caldeira.

O PCS não passou de 24,9 MJ g⁻¹, no entanto é superior ao PCS do capim elefante BRS Capiáçu 15,1 MJ g⁻¹, o esperado se comparado com a literatura. De maneira geral a densidade aparente e a granel dos *pellets* produzidos, diminui com o aumento da porcentagem do lodo na mistura, no entanto a densidade energética aumenta uma vez que o PCS do lodo flotado é maior. *Pellets* com maior densidade energética liberam maior quantidade de energia por unidade de volume durante a queima, tratando-se de um material compactado configura-se em uma vantagem também quando se pensa em transporte de carga.

Os termogramas dos tratamentos com maior teor de material lignocelulósico, advindo do capim BRS Capiáçu (T1 a T4), evidenciaram a ocorrência de três eventos térmicos. O primeiro, entre 90 - 100 °C referente à perda de umidade do material, que em materiais lignocelulósicos está contida na celulose devido as características hidrofílicas. No segundo evento, a pirólise da celulose, que ocorreu entre 250 - 340 °C para T1 e T2, entre 210 - 300 °C para T3 e entre 200 - 300 °C para T4. O terceiro evento, que é referente a pirólise da lignina, ocorrendo entre 390-700 °C para T1 e entre 400-700 °C para T2, T3 e entre 550 - 700 °C para T4. Para materiais com maiores teores de lodo (T5 - T7), a combustão se processou também

em três etapas. A primeira foi correspondente a evaporação da umidade, entre 90-100 °C, a segunda a pirólise do material e queima dos compostos voláteis, entre 230 - 340 °C e a terceira a queima do carbono fixo, entre 550 - 700 °C.

Por meio das análises de regressão, as equações obtidas permitem determinar em função da porcentagem utilizada de lodo 0 – 100 % (de capim elefante ou de lodo) na composição final dos *pellets*, qual o valor de uma determinada variável (umidade, cinzas, carbono fixo, materiais voláteis e PCS) e escolher a porcentagem a ser utilizada priorizando a característica desejada do *pellet*.

Desta forma, *pellets* a partir de Capim elefante BRS Capiacu e lodo flotado, podem gerar um produto alternativo aos *pellets* disponíveis no mercado. Agregando valor a um resíduo da agroindústria, diminuindo impactos ambientais pelas disposições incorretas e incentivando empresas e pesquisadores a explorarem mais essas biomassas e esses biocombustíveis para energia.

REFERÊNCIAS

- ABE, F. M. **Análise do gerenciamento de resíduos sólidos e líquidos de uma cooperativa agroindustrial**. 2012. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Produção), Universidade Estadual de Maringá, Maringá (PR), 2012. Disponível em: http://www.dep.uem.br/gdct/index.php/dep_tcc/article/view/692. Acesso em: 20 de abril de 2023.
- ALMEIDA, R. R. **Estudo do bagaço de mandioca (*Manihot esculenta c.*), nativo e tratado com α – amilase e amiloglicosidase, por meio de técnicas termoanalíticas**. 2009. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa (PR), 2009. Disponível em: <http://tede2.uepg.br/jspui/handle/prefix/703>. Acesso em: 14 de março de 2023.
- ALMEIDA, C. A. S. M. **Prospecção do lodo de ETE com capim elefante e óleo de cozinha residual como alternativa energética de pellets**. 2020. 69 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento), Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 09898**: Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8293**: Carvão mineral - Determinação de umidade. Rio de Janeiro, 1983.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8633**. Carvão vegetal- Determinação do Poder Calorífico. Out/ 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Resíduos sólidos: Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT. 2004. 71 p. Disponível em: <https://analiticaqmresiduos.paginas.ufsc.br/files/2014/07/Nbr-10004-2004-Classificacao-De-Residuos-Solidos.pdf>.
- ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D2395-14**: “Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Wood and Wood-Based Materials”, 2015.
- BETIOL, L. F. L. **Estudo das isotermas de adsorção do bagaço de mandioca proveniente da indústria de fécula**. 2016. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos) - Universidade Estadual Paulista, São José do Rio Preto (SP), 2016. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/145009>. Acesso em: 12 de fevereiro de 2023.
- BIZERRA, D. A. U. B. **Avaliação da palha de carnaúba in natura e carbonizada para produção de combustíveis sólidos: análise imediata, poder calorífico e densificação da biomassa**. 2017. 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará,

Fortaleza (CE), 2017. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/45496>. Acesso em: 10 de março de 2023.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Editora Inter ciência, Rio de Janeiro. 2010.

BRUMANO, G. D. C. B. **Avaliação de lignina solúvel em materiais lignocelulósicos pela técnica de pirólise associada à cromatografia gasosa e à espectrometria de massas**. 2015. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agroquímica, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

CARVALHO, A. C.; GOMES, I. R. F.; COSTA, S. E. L.; CASTRO, R. V. O.; SANTOS, R. C. Produção de *pellets* de capim elefante (*Pennisetum purpureum* Schum). **Anais...** Congresso internacional da diversidade do semiárido - CONIDIS, Campina Grande, 2017. Disponível em: <https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/33783>. Acesso em: 29 de setembro de 2023.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: Unicamp, 2008. p. 15-28.

COUTO, L.; MULLER, M. D.; SILVA JUNIOR, A. G.; CONDE, L. J. N. Produção de *pellets* de madeira – o caso da Bio-Energy no Espírito Santo. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 1, p. 45-52, 2004. Disponível em: <https://docplayer.com.br/5309010-Producao-de-peletes-de-madeira-o-caso-da-bio-energy-no-espirito-santo-1.html>. Acesso em: 22 de junho de 2023.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN EM 1496-1**. Biocombustíveis sólidos – Especificações e classe de combustíveis. 2012

DIAS, José Manuel Cabral de Sousa. *et al.* **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. 1 ed. Brasília: EMBRAPA, 2012. 130 p. ISBN: 2177-4439.7

DUARTE, L. D. C.; JUCHEM, P. L.; PULZ, G. M.; DE BRUM, T. M. M.; CHODUR, N.; LICCARDO, A.; FISCHER, A. C.; ACAUAN, R. B. Aplicações de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e sistema de energia dispersiva (EDS) no estudo de gemas: Exemplos Brasileiros. **Pesquisas Geociências**, v. 30, n. 2, p. 3-15, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.22456/1807-9806.19585>. Acesso em: 15 de abril de 2023.

EBRINGEROVA, A. Structural diversity and application potential of hemiceluloses. **Macromolecular Symposia**, v. 232, n. 1, special Issue: Hemicelluloses, p. 1-12, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/masy.200551401>. Acesso em: 14 de março de 2023.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Anuário estatístico de energia elétrica 2020 ano base 2019**. Ministério de Minas e Energias, 256 p, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>. Acesso em: 12 de janeiro de 2023.

EUROPEAN STANDARD NORME (ESN). **EN 14961-6**. EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, January 2012.

FACCINI, C. S. **Obtenção de bio-óleos por pirólise de resíduos da indústria de celulose e sua caracterização por cromatografia gasosa**. 2012. 140 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal do rio Grande do Sul, RS, 2012.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **The state of food and agriculture 2022**. Leveraging automation in agriculture for transforming agrifood systems. Rome, FAO, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/cb9479en>. Acesso em: 10 de junho de 2023.

FAGNANI, K. C.; ALVES, H. J.; CASTRO, L. E. N.; KUNH, S. S.; COLPINI, L. M. S. An alternative for the energetic exploitation of sludge generated in the physico-chemical effluent treatment from poultry slaughter and processing in Brazilian industries. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, n. 2, p. 102996, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.102996>. Acesso em: 15 de maio de 2023.

FERREIRA, I. T.; SCHIRMER, W.; Machado; G. O.; Gueri, M. Estimativa do potencial energético de resíduos celulósicos de fabricação de papel, através de análise imediata. **Revista Brasileira de Energias renováveis**, v.3, n. 4, p. 284-297, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/rber.v3i4.38618>. Acesso em: 23 de julho de 2023.

FERREIRA, D.F. **Sisvar**. Universidade Federal de Lavras, versão 5.6, 2006. Disponível em: <https://des.ufla.br/~danielff/programas/sisvar.html>. Acesso em: 23 de julho de 2022.

FIORDA, F. A.; SOARES JÚNIOR, M. S.; SILVA, F. A.; SOUTO, L. R. F.; GROSSMANN, M. V. E. Farinha de bagaço de mandioca: aproveitamento de subproduto e comparação com fécula de mandioca. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 3, n. 4, p.408-416, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1983-40632013000400005>. Acesso em: 13 de setembro de 2023.

FIGUEROA, M. J. M.; MORAES, P. D. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 4, p. 157-174, 2009. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/9547>. Acesso em: 20 de agosto de 2023.

FONTS, I.; GEA, G.; AZUARA, M.; ÁBREGO, J.; ARAUZO, J. Sewage sludge pyrolysis for liquid production: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 2781-2805, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.070>. Acesso em: 13 de setembro de 2023.

GARCIA, D. P.; CARASHI, J. C.; VENTORIM, G. Decomposição térmica de *pellets* de madeira por TGA. **HOLOS**, ano 32, v. 1, p. 327-339, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.15628/holos.2016.3886>. Acesso em: 20 de setembro de 2023.

GARCIA, D. P.; CARASHI, J. C.; DAL BEM, E. A.; FERREIRA, J. P.; SOUZA, F. M. L.; VIEIRA, F. H. A.; DIAS, R. R. Mapas dos produtores brasileiros de biocombustível *pellets*. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 12, n. 4, p. 333-339, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.18011/bioeng2018v12n4p333-339>. Acesso em: 15 de julho de 2023.

GARCIA, D. P. **Pelletes de madeira**: revisão bibliográfica. 2008. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado - Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Campus Experimental de Itapeva, Itapeva (SP), 2008. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/142903>. Acesso em: 23 de agosto de 2023.

HAO, Z.; YANG, B.; JAHNG, D. Combustion characteristics of biodried sewage sludge. **Waste Management**, v. 72, p. 296-305, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.11.008>. Acesso em: 20 de junho de 2023.

JAYARAMAN, K.; GOKALP, J. Pyrolysis, combustion and gasification characteristics of miscanthus and sewage sludge. **Energy Conversion and Management**, v. 89, p. 83-91, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.09.058>. Acesso em: 12 de julho de 2023.

JUNIOR, A. R. L.; FONSECA, B. G.; SILVA, M. E. Produtos ecoeficientes na arquitetura: o emprego de materiais lignocelulósicos. **Janus**, n. 20, 2014.

JUPPA, A. M. R. **Produção de pellets a partir da biomassa de capim elefante BRS Kurumi, lodo flotado e bagaço de mandioca**. 2022. 78f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Energias) – Universidade Federal do Paraná, Palotina (PR), 2022.

KAN, T., STREZOV, V., EVANS, T.J. Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.57, p.1126-1140, 2016.

LESSA, M. O. **Pirólise Flash de diferentes cultivares do Capim Elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.)**. 2019. 98 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

MACEDO, J. C. F. **Análise térmica e ambiental da queima do lodo primário da fabricação de papel e celulose em caldeira de biomassa à grelha**. 2006. 196 f. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, MG, 2006

MAGALHÃES, M. A.; DONATO, D. B.; CANAL, W. D.; CARNEIRO, A. C. O.; PEREIRA, B. L. C.; VITAL, B. R. Caracterização de *pellets* produzidos a partir de capim-elefante para uso energético. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**. v. 7, n. 3, p. 155-162, 2016. Disponível em:

<https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v7n3p155-162>. Acesso em: 29 de setembro de 2023.

MANTOVAN, F. M. **Estudo da queima do lodo flotado de estação de tratamento de efluentes em caldeiras a biomassa**. 2022. 100 f. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) – Universidade Federal do Paraná, Palotina (PR), 2022. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1884/76259>. Acesso em: 29 de julho de 2023.

MARAFON, A. C.; SANTIAGO, A. D.; **Capim elefante como biomassa para produção de energia**. 1 ed. Aracajú :Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2015, 2 p.

MARAFON, A. C.; SANTIAGO, A. D.; AMARAL, A. F. C.; BIERHALS, A. N.; PAIVA, H. L.; GUIMARÃES, V. S. Secagem ao solo do capim elefante para uso na geração de energia térmica. **Revista Brasileira de Biomassa e Energia**, v. 6, n. 33, p. 10-13, 2017. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/169819/1/Secagem.pdf>. Acesso em: 20 de setembro de 2023.

MENEGHINI, C.; PROINELLI, R. F. Análise de viabilidade da queima de lodo frigorífico em uma caldeira à lenha. **Unoesc & Ciência – ACET**, p. 7-14, 2015. Disponível em: <https://periodicos.unoesc.edu.br/acet/article/view/6858>. Acesso em: 23 de abril de 2023.

MUTCHAMUA, H. H. G. **Estabilização de lodo de lagoas de tratamento biológico de efluentes via desnitrificação**. 2019. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis (SC), 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/211436/PEAL0357-D.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Acesso em: 30 de maio de 2023.

OLIVEIRA, A. C.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; ALMEIDA, W.; PEREIRA, B. L. C.; CARDOSO, Marco T. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. **Scientia Forestalis**, v.38, n.87, p.431-439, 2010. Disponível em: <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br:80/handle/123456789/16468>. Acesso em: 10 de março de 2023.

Österreichisches Normungsinstitut. **ÖNORM M7135**. Compressed wood or compressed bark in natural state – *pellets* and briquettes requirement and test specifications. Vienna, Austria:, 2000.

PADILHA, J.; KUREK, A. P.; SOUZA, O.; SELLIN, N. Avaliação da potencialidade energética de lodos gerados no tratamento de efluentes da abatedouros e frigoríficos de aves. Encontro técnico AESABESP, Joinville, SC, Brasil, 2019. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/artigo/potencialidade-energetica-lodos-efluentes-abatedouros/>. Acesso em: 10 de janeiro de 2023.

PARANÁ. Resolução SEMA nº 42 de 22/07/2008. Estabelece critérios para a queima de resíduos em caldeiras e dá outras providências. **Diário Oficial do Estado do Paraná (DOE – PR)**, Curitiba, 25 jul. 2008. Disponível em:

<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=143911>. Acesso em: 10 de setembro de 2023.

PASQUINI, N. C. Uso potencial como fonte de energia de lodo proveniente de esgoto doméstico e industrial. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, v.16, n. 1, p. 35-57, 2014. Disponível em: <https://revistas.unicentro.br/index.php/RECEN/article/view/2925/2351>. Acesso em: 15 de setembro de 2023.

PIO, D. T.; TARELHO, L.A.C.; NUNES, T.F.V.; BAPTISTA, M.F.; MATOS, M. A. A. Co-combustion of residual forest biomass and sludge in a pilot-scale bubbling fluidized bed. **Journal of Cleaner Production**, v. 249, p. 119309, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119309>. Acesso em: 15 de julho de 2023.

PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; DE SIQUEIRA, H. F.; DE MELO, I. C. N. A.; ANDRADE, C. R.; GUIMARÃES JUNIOR, J. B. Caracterização energética de *pellets* in natura e torreficados produzidos com madeira residual de Pinus. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 84, p. 435–442, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.4336/2015.pfb.35.84.843>. Acesso em: 24 de março de 2023.

OriginLab. **Origin 8.5**, *Version* 2010, OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA.

QUÉNO, L. R. M. **Produção de Pellets de madeira**: estratégia, custo e risco de investimento. 2015. 162 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília (DF), 2015. Disponível em: https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/20726/1/2015_LaurentRogerMarieQu%c3%a9no.pdf. Acesso em: 24 de maio de 2023.

QUÉNO, L. R. M.; SOUZA, A. N.; COSTA, A. F.; VALE, A. T.; JOAQUIM, M. S. Aspectos técnicos da produção de *pellets* de madeira. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 3, p. 1478-1489, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509820606>. Acesso em: 15 de agosto de 2023.

RODRIGUES, T.O., **Efeitos da Torrefação no Condicionamento de Biomassa para Fins Energéticos**. 2009. 82f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Florestal. Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

RODRIGUES, B. V. C. **Produção de pellets utilizando lodo primário gerado na indústria de celulose kraft**. 58 f. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2020.

ROSA, A. P.; CHERNICHARA, C. A. L.; MELO, G. C. B. Contribuição para o aproveitamento energético do lodo de ETEs em processos térmicos. **Revista DAE**, n. 198, p. 55-62, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2014.140>. Acesso em: 13 de agosto de 2023.

SCHETTINI, B.; SILVA, M.; JACOVINE, L. A.; ALVES, E.; VILLANOVA, P. H. Avaliação da concentração do mercado mundial de *pellets* de madeira e as oportunidades para o Brasil. **Enciclopédia biosfera**, v. 13, n. 23, 2016. Disponível

em: <https://conhecer.org.br/ojs/index.php/biosfera/article/view/1176>. Acesso em: 23 de maio de 2021.

SENA, R. F.; CLAUDINO, A.; MORETTI, K.; BONFANTI, Í. C.P.; MOREIRA, R. F.P.M.; JOSÉ, H. J. Biofuel application of biomass obtained from a meat industry wastewater plant through the flotation process—A case study. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 52, n. 3, p. 557-569, 2008. Disponível em: <http://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.07.002>. Acesso em: 14 de setembro de 2023.

SOUZA, M. M.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; BARBOSA, A. C. Produção e avaliação de *pellets* compostos por diferentes proporções de resíduos sólidos urbanos. **Nature and Conservation**, v.13, n.3, p.80- 92, 2020. Disponível em: <http://doi.org/10.6008/CBPC2318-2881.2020.003.0008>. Acesso em: 14 de julho de 2023.

Standard Test Methods for Analysis of Wood Fuels. **ASTM E870-82(2019)**. Disponível em: <https://www.astm.org/e0870-82r19.html>

Standard Test Method for Ash in Wood. **ASTM D1102-84(2021)**. Disponível em: <https://www.astm.org/d1102-84r21.html>

Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels. **ASTM E871-82(2019)**. Disponível em: <https://www.astm.org/e0871-82r19.html>. Acesso em 20 de outubro de 2023

Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels. **ASTM E872-82(2019)**. Disponível em: <https://www.astm.org/e0872-82r19.html>

VIEIRA, A. C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas**. 2012. 72 f. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel (PR), 2012.

VIRMOND, E.; SCHACKER, R. L.; ALBRECHT, W.; ALTHOFF, C. A.; SOUZA, M. de; MOREIRA, R. F.P.M.; JOSÉ, H. J. Organic solid waste originating from the meat processing industry as an alternative energy source. **Energy**, v. 36, n. 6, p. 3897-3906, 2011. Disponível em: <http://doi.org/10.1016/j.energy.2010.08.026>. Acesso em: 14 de setembro de 2023.

WERTHER, J.; OGADA, T. Sewage sludge combustion. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 25, n. 1, p.55-116, 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(98\)00020-3](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(98)00020-3). Acesso em: 28 de março de 2023.

XIE, Z.; MA, X. The thermal behaviour of the co-combustion between paper sludge and rice straw. **Bioresource Technology**, v. 146, p. 611-618, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.07.127>. Acesso em: 15 de janeiro de 2023.

YILMAZ, E.; WZOREK, M.; AKÇAY, S. Co-pelletization of sewage sludge and agriculture wastes. **Journal of Environmental Management**, v. 216, p. 169-175, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.012>. Acesso em: 13 de março de 2023

