

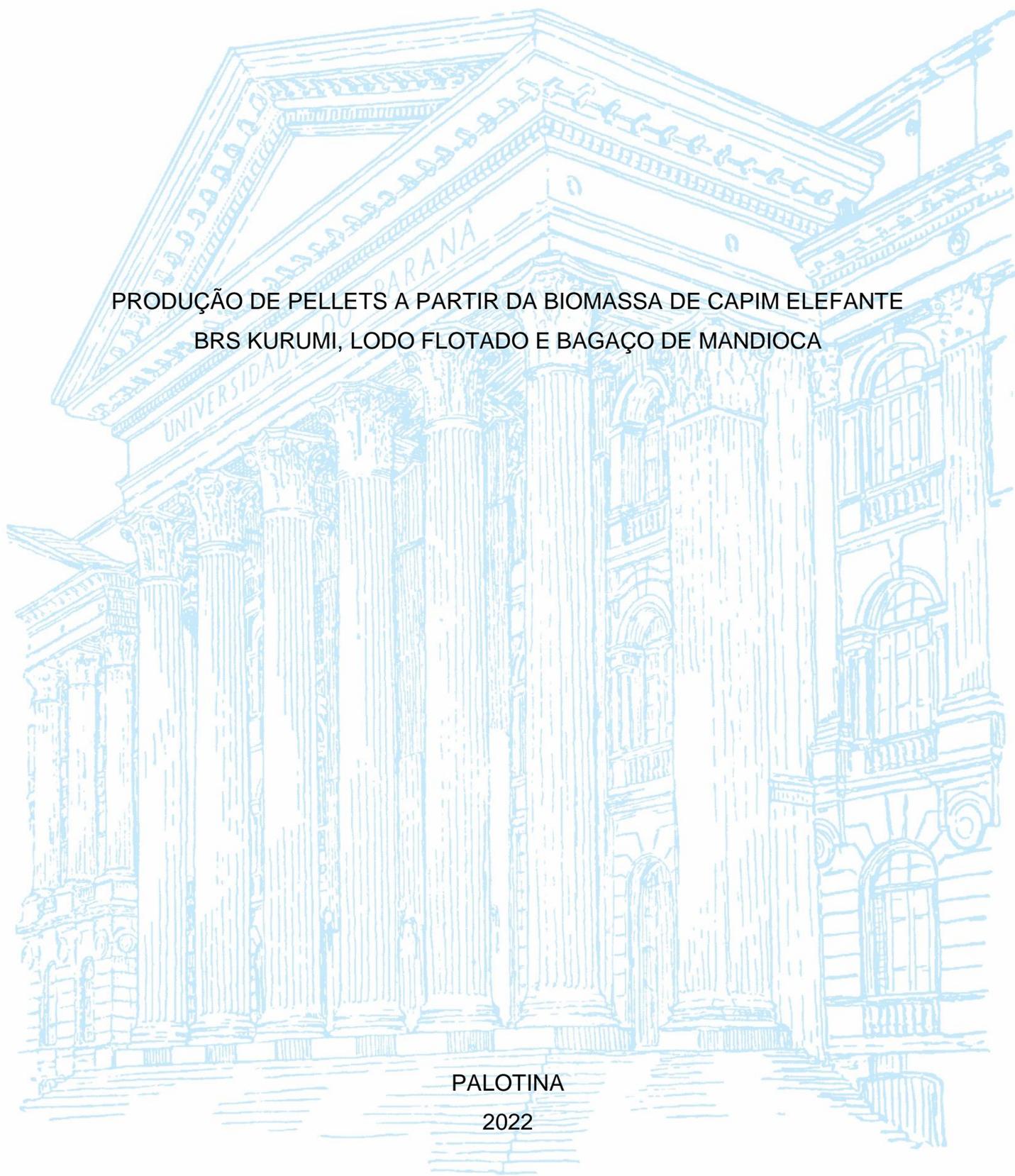
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANNA MARIA REMONTI JUPPA

PRODUÇÃO DE PELLETS A PARTIR DA BIOMASSA DE CAPIM ELEFANTE
BRS KURUMI, LODO FLOTADO E BAGAÇO DE MANDIOCA

PALOTINA

2022



ANNA MARIA REMONTI JUPPA

PRODUÇÃO DE PELLETS A PARTIR DA BIOMASSA DE CAPIM ELEFANTE
BRS KURUMI, LODO FLOTADO E BAGAÇO DE MANDIOCA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Graduação em
Engenharia de Energia, Setor Palotina,
Universidade Federal do Paraná, como
requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia de Energia.

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

PALOTINA

2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ATA DE REUNIÃO

Aos cinco dias do mês de maio do ano de 2022, no horário das 14:00 às 15:40 horas, Microsoft Teams https://teams.microsoft.com/l/meetup-join/19%3ameeting_OGQ3YW15ZDctZDdmOS00YTk3LWJlOGItNTRkNDE4YjRlZDg2%40thread.v2/0?context=%7b%22Tid%22%3a%22c37b37a3-e9e2-42f9-bc67-4b9b738e1df0%22%2c%22Oid%22%3a%22633a5301-cff5-41a7-b6f5-739adc524d71%22%7d, compareceram para defesa pública do Trabalho de Conclusão de Curso, requisito obrigatório para a obtenção do título de Engenheiro de Energia a aluna Anna Maria Remonti Juppa, tendo como Título do Trabalho de Conclusão de Curso "Produção de pellets a partir da biomassa de Capim Elefante BRS Kurumi, lodo flotado e bagaço de mandioca".

Constituíram a Banca Examinadora os professores: Prof. Dr. Eduardo Lucas Konrad Burin, Prof. Dr. Joel Gustavo Teleken e Profª. Drª. Adriana Ferla de Oliveira (Orientadora e Presidente da Banca).

Após avaliação a banca se reuniu na sala virtual <https://meet.google.com/nzg-jirk-esn> para deliberação da banca avaliadora, sendo assim ficou definido que o trabalho foi considerado **APROVADA** com conceito 90 (0 a 100) pontos.

Eu, presidente da banca, lavrei a presente ata que segue assinada por mim e demais membros:



Documento assinado eletronicamente por **ADRIANA FERLA DE OLIVEIRA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/05/2022, às 15:45, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **EDUARDO LUCAS KONRAD BURIN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/05/2022, às 15:47, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **JOEL GUSTAVO TELEKEN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/05/2022, às 15:50, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida [aqui](#) informando o código verificador **4465862** e o código CRC **4558DE93**.

Dedico este estudo a minha
sobrinha Maria Luísa.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a Deus por ter me concedido esta vida. Agradeço a minha orientadora Prof^a. Dr^a. Adriana Ferla de Oliveira por toda a dedicação e a confiança depositada a mim para este projeto, obrigada por sempre me motivar durante todo o processo.

Agradeço imensamente a minha família em especial minha mãe Marinês e meu pai Ireno por sempre estarem comigo durante todo este trajeto e sempre acreditarem em mim, também agradeço ao meu irmão Douglas pelo apoio e atenção, a Janaina pelo incentivo aos estudos e aos meus sobrinhos para quem eu quero ser referência Maria Luísa e Miguel.

A todos os professores que contribuíram com a minha formação, obrigada pelas correções e ensinamentos que me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional ao longo do curso.

Aos amigos, que sempre estiveram ao meu lado, com quem convivi ao longo desses anos de curso, que me incentivaram e que certamente tiveram impacto na minha formação, que me permitiram crescer não só como pessoa, mas também como formanda.

Também agradeço aos funcionários da Universidade que contribuíram diretamente e indiretamente para a conclusão deste trabalho. E a todos aqueles que contribuíram, de alguma forma, para a realização deste trabalho.

RESUMO

A busca por alternativas mais limpas de produção energética utilizando fontes renováveis, vem crescendo cada vez mais. A biomassa vegetal, especialmente o capim elefante e seus genótipos vem sendo alvo de estudos para fins energéticos, devido à alta produção e qualidade de biomassa (produção de forragem, tempo de rebrota curto e elevado poder calorífico). Nas indústrias de processamento de carne especialmente os abatedouros e frigoríficos, grande quantidade de efluentes é gerado devido ao elevado consumo de água nos processos. Esses efluentes são altamente poluentes, além da complexidade de seu tratamento e elevados custos advindos para um manejo adequado. No processamento da mandioca, além da extração do amido, são gerados subprodutos, como o bagaço da mandioca, seu descarte se enquadra como um potencial agente poluidor ao meio ambiente. Assim, estes subprodutos juntamente com a biomassa de capim elefante, poderia ser melhor aproveitada se submetida aos processos de produção de biocombustíveis sólidos. Dentre os processos para melhorar as características energéticas destes materiais *in natura* destaca-se a peletização, que por compactação, gera um material granulado denominado de pellet, de alta densidade energética. Deste modo, o objetivo do presente trabalho foi produzir pellets de capim elefante cv. BRS Kurumi com lodo flotado de efluente agroindustrial e bagaço de mandioca. A biomassa de capim-elefante, o lodo flotado e o bagaço de mandioca foram caracterizados quanto às suas propriedades físico-químicas e energéticas. As misturas propostas com adição de lodo (0 - 20%) e bagaço de mandioca (0 a 2%) a biomassa de capim Kurumi foram compactadas em peletizadora modelo ATX. Os pellets (TK, TKL, TKLB1, TKLB2) foram caracterizados por análise imediata, densidade aparente, densidade a granel e energética, poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI). Observou-se que os pellets produzidos com 100% capim BRS Kurumi (TK) apresentaram um elevado teor de cinzas (14,66%), e na adição do lodo flotado (TKL) esse valor diminuiu (7,28%), aumentando o teor de carbono fixo (18,14%), o que conseqüentemente aumentou o PCS para $17,42 \text{ MJ.kg}^{-1}$, e a densidade energética a granel para $8,25 \text{ GJ.m}^{-3}$, e a densidade aparente para $17,73 \text{ GJ.m}^{-3}$. Visualmente a adição de bagaço de mandioca ao capim Kurumi e ao lodo, nas condições de umidade, granulometria e equipamento utilizado não contribuiu para a agregação das partículas, confirmado pela densidade, onde o tratamento TKL apresentou maior densidade aparente e maior densidade energética. No entanto, TKLB2 foi melhor que TKLB1. De modo geral, todos os tratamentos propostos são possíveis de serem realizados apresentando características físico-químicas e energéticas promissoras para sua utilização como biocombustíveis sólidos.

Palavras-chave: Capim BRS Kurumi. Lodo flotado. Bagaço de mandioca. Pellets. Fins energéticos.

ABSTRACT

The search for cleaner alternatives for energy production using renewable sources has been growing increasingly. Lignocellulosic biomass, such as vegetable biomass, especially elephant grass and its genotypes have been the target of studies for energy purposes, due to the high production and quality of biomass. In industrial meat processing plants, especially slaughterhouses and meat packing plants, a large amount of effluents are generated due to the high consumption of water in the processes. These effluents are highly polluting, besides the complexity of their treatment and high costs for an adequate management. In cassava processing, besides the extraction of starch, by-products are generated, such as cassava bagasse, its disposal fits as a potential pollutant to the environment. Thus, these by-products, along with the elephant grass biomass, could be better utilized if subjected to solid biofuel production processes. Among the processes to improve the energy characteristics of these materials in natura is the pelletization, which by compacting, generates a granulated material called pellet, with high energy density. Thus, the objective of this work was to produce elephant grass pellets cv. BRS Kurumi with floated sludge from agroindustrial effluent and cassava bagasse. The elephant grass biomass, the floated sludge and the cassava bagasse were characterized for their physicochemical and energetic properties. The proposed mixtures with addition of sludge (0 - 20%) and cassava bagasse (0 to 2%) to Kurumi grass biomass were compacted in an ATX model pelletizer. The pellets (TK, TKL, TKLB1, TKLB2) were characterized by immediate analysis, bulk density, bulk density and energy, upper calorific value (HHV) and lower calorific value (LHV). It was observed that the pellets produced with 100% BRS Kurumi grass (TK) showed a high ash content (14.66%), and in the addition of the floated sludge (TKL) this value decreases (7.28%), increasing the fixed carbon content (18.14%), which consequently increased the PCS 17.42 MJ.kg⁻¹, and the bulk energy density 8.25 GJ.m⁻³, the bulk density of these pellets also became high 17.73 GJ.m⁻³. Visually the addition of cassava bagasse to Kurumi grass and sludge, under the conditions of moisture, particle size and equipment used did not contribute to the aggregation of the particles, confirmed by the density, where the TKL treatment showed higher bulk density and higher energy density. However, TKLB2 was better than TKLB1. In general, all the proposed treatments are possible to be carried out presenting promising physicochemical and energetic characteristics for their use as biofuels.

Key-words: BRS Kurumi grass. Flooded sludge. Cassava bagasse. Pellets. Energetic purposes.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – PRINCIPAIS FONTES DE ENERGIA BRASILEIRA EM 2020.....	19
FIGURA 2 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DOS PROCESSOS DE CONVERSÃO DA BIOMASSA.....	20
FIGURA 3 – CAPIM BRS KURUMI	24
FIGURA 4 – LODO FLOTADO PROVENIENTE DO TRATAMENTO DE FLOTAÇÃO.....	29
FIGURA 5 – FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE PELETIZAÇÃO.....	34
FIGURA 6 – LOCALIZAÇÃO DAS PLANTAS DE PELLETS ASSOCIADAS NO BRASIL	35
FIGURA 7 – CAPIM BRS KURUMI COLETADO	37
FIGURA 8 – LODO FLOTADO PROVENIENTE DA AGROINDUSTRIA	38
FIGURA 9 – BAGAÇO DE MANDIOCA COLETADO.....	38
FIGURA 10 – FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DE PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS PELLETS.....	39
FIGURA 11 – FORRAGEIRA UTILIZADA PARA MOAGEM DE MATERIAL ...	40
FIGURA 12 – AMOSTRAS MOIDAS NA FORRAGEIRA (A) CAPIM BRS KURUMI, (B) LODO FLOTADO	40
FIGURA 13 – PELETIZADORA UTILIZADA PARA COMPACTAÇÃO DO MATERIAL	48
FIGURA 14 – DISTRIBUIÇÃO DAS PARTICULAS APÓS MOAGEM	52
FIGURA 15 – 100% CAPIM BRS KURUMI (TK).....	57
FIGURA 16 – 100% LODO (TL).....	57
FIGURA 17 – 80% CAPIM BRS KURUMI + 20% LODO 58 (TKL).....	58
FIGURA 18 – 9% CAPIM BRS KURUMI + 20% LODO + 1% BAGAÇO DE MANDIOCA (TKLB1)	58
FIGURA 19 – 78% CAPIM BRS KURUMI + 20% LODO + 2% BAGAÇO DE MANDIOCA (TKLB2)	59

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PARÂMETROS E MÉTODOS DE ANÁLISE	42
TABELA 2 – PARÂMETROS DE ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA	45
TABELA 3 – DETERMINAÇÃO DA PROPORÇÃO DAS MISTURAS.....	47
TABELA 4 – ANÁLISES E REFERÊNCIAS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS PELLETS PRODUZIDOS.....	49
TABELA 5 – TEOR DE UMIDADE DAS AMOSTRAS NO LOCAL DE COLETA.....	51
TABELA 6 – ANÁLISE IMEDIATA DO MATERIAL SEM MISTURAS	53
TABELA 7 – VALORES DE ANÁLISE IMEDIATA DE DIFERENTES CULTIVARES DO CAPIM ELEFANTE ENCONTRADO EM LITERATURA.....	54
TABELA 8 – RESULTADOS DE ANÁLISE IMEDIATA PARA O LODO DE EFLUENTE ENCONTRADO EM LITERATURA	54
TABELA 9 – RESULTADOS ENCONTRADOS EM LITERATURA PARA A ANÁLISE IMEDIATA DO BAGAÇO DE MANDIOCA	55
TABELA 10 – RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO CAPIM BRS KURUMI.....	56
TABELA 11 – ANÁLISE IMEDIATA DOS PELLETS	59
TABELA 12 – PODER CALORÍFICO DOS PELLETS.....	61
TABELA 13 – DENSIDADE A GRANEL, APARENTE E DENSIDADE ENERGÉTICA DOS PELLETS	63
TABELA 14 – COMPARAÇÃO DA DENSIDADE A GRANEL E DENSIDADE ENERGÉTICA A GRANEL EM LITERATURA	64

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ABRELPE	-Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ABIPEL	-Associação Brasileira das Indústrias de Pellets
BAGCE	-Banco Ativo de Germoplasma de Capim-elefante da Embrapa
BRS	-Identificação dos materiais provenientes do programa de melhoramento genético da Embrapa
BM	-Bagaço de Mandioca
CEL	-Celulose
CF	-Carbono Fixo
CK	-Capim Kurumi
Cv.	-Cultivar
Cz	-Cinzas
EMBRAPA	-Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETE	-Estação de Tratamento de Efluentes
FL	-Lodo Flotado
MV	-Materiais Voláteis
MS	-Matéria Seca
PC	-Poder Calorífico
PCI	-Poder Calorífico Inferior
PCS	-Poder Calorífico Superior
SEMA	-Secretaria do Meio Ambiente
SNIF	-Sistema Nacional e Informações Florestais
TK	-Pellet 100% Capim Kurumi
TL	-Pellet 100% Lodo Flotado
TKL	-Pellet 80% Capim Kurumi + 20% Lodo Flotado
TKLB1	-Pellet 78% Capim Kurumi + 20% Lodo Flotado + 1% Bagaço de Mandioca
TKLB2	-Pellet 78% Capim Kurumi + 20% Lodo Flotado + 2% Bagaço de Mandioca
W	-Umidade

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 JUSTIFICATIVA	14
1.2 OBJETIVO GERAL	15
1.2.1 Objetivos Específicos	16
2 REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1 BIOMASSA.....	17
2.2 BIOMASSA PARA ENERGIA.....	17
2.2.1 Os resíduos gerados a partir da biomassa.....	21
2.3 CAPIM-ELEFANTE	22
2.3.1 Capim Elefante cultivar BRS Kurumi.....	23
2.3.2 Análise para potencial energético do capim elefante	24
2.3.2.1 Análise imediata do capim elefante	25
2.3.2.2 Análise química elementar do capim elefante	26
2.4 LODO DE EFLUENTE AGROINDUSTRIAL.....	27
2.5 BAGAÇO DE MANDIOCA.....	31
2.6 PELLETS.....	32
2.6.1 Mercado de Pellets no Brasil.....	34
3 MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1 COLETA E PREPARO DAS AMOSTRAS.....	37
3.1.1 Determinação do teor de umidade das amostras no local de coleta	41
3.1.1.1 Determinação da produção de massa seca de capim Kurumi no local de coleta.....	41
3.1.2 Perfil granulométrico.....	41
3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO LODO, CAPIM BRS KURUMI E BAGAÇO DE MANDIOCA.....	42
3.2.1 Análise imediata das matérias primas.....	42

3.2.1.1	Determinação da umidade	42
3.2.1.2	Determinação do teor de materiais voláteis	43
3.2.1.3	Determinação do teor de cinzas	43
3.2.1.4	Determinação do teor de carbono fixo.....	44
3.2.2	Análise química do capim BRS Kurumi.....	44
3.2.2.1	Determinação do teor de lignina.....	45
3.2.2.2	Determinação do teor de holocelulose	45
3.2.2.3	Determinação do teor de celulose	46
3.3	DETERMINAÇÃO DE PROPORÇÃO DE MISTURA PARA OS PELLETS	46
3.4	DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO.....	47
3.5	PROCESSO DE PELETIZAÇÃO	48
3.6	ANÁLISE ESTATÍSTICA	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DAS AMOSTRAS.....	51
4.1.1	Teor de umidade das amostras coletadas.....	51
4.1.1.1	Produção de massa seca de capim BRS Kurumi.....	51
4.1.2	Perfil granulométrico das amostras	52
4.1.4	Análise química do capim BRS Kurumi.....	55
4.2	AVALIAÇÃO DOS PELLETS PRODUZIDOS.....	57
4.2.1	Poder calorífico estimado dos pellets.....	61
4.2.2	Densidade a granel, densidade aparente e energéticas	63
5	CONCLUSÃO	66
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	66
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

1 INTRODUÇÃO

O uso de combustíveis fósseis em diversas atividades, como transporte, produção de eletricidade e em indústrias causa preocupação mundial devido ao aquecimento global e as mudanças climáticas causadas pelas emissões de gases de efeito estufa (SAOSEE; SAJJAKULNUKIT; H.GHEEWALA, 2022). Nesse sentido, a busca por alternativas mais limpas de produção energética utilizando fontes renováveis, vem crescendo cada vez mais diante das preocupações ambientais (LIMA *et al.*, 2016).

Na procura de opções energéticas que sejam menos poluentes, a biomassa proveniente de várias plantas e oleaginosas, principalmente as de origem agrícola e florestal, é uma das fontes de energia renovável que pode substituir, ao menos parcialmente, os combustíveis fósseis, colaborando com o meio ambiente e com o desenvolvimento econômico do país (FAGNINI, 2017; TANABE, 2017).

Dessa forma, a biomassa vegetal proveniente do Capim elefante (*Pennisetum purpureum*), que é uma gramínea originada da África subtropical descoberta em 1905, vem adquirindo importância neste quadro estratégico e tem sido alvo de estudos para fins energéticos, devido a sua alta produção e qualidade de biomassa (TANABE, 2017; Adaptado de Rodrigues *et al.*, 2001; ALMEIDA, 2020).

Existem práticas de produção de combustíveis sólidos a partir da biomassa, como a peletização, que vem ganhando destaque no cenário brasileiro. A peletização é um processo de densificação da biomassa, podendo ou não conter aditivos, produzidos com o intuito de aprimorar a eficiência na produção de energia (CARVALHO *et al.*, 2017; NIEDZIÓŁKA *et al.*, 2015). Misturas de diferentes tipos de materiais à biomassa para melhorar as propriedades dos pellets foi certificada em vários estudos, destacando os que tiveram o lodo de Estação de Tratamento de Efluente (ETE) como incremento a biomassa para a produção de pellet (ALMEIDA, 2020).

O lodo de efluente é um subproduto inevitável decorrente dos processos de utilização da água em indústrias de unidade de abate e processamento de carne, cujo volume aumentou rapidamente com a industrialização e urbanização

(DING *et al.*, 2021). Esses efluentes são altamente poluentes e, se dispostos de maneira inadequada podem levar a sérios problemas ambientais, além da complexidade de seu tratamento e pelos custos advindos de seu manejo adequado (JORDÃO E PESSOA, 2005), o lodo geralmente é destinado a descarte, compostagem e a aterros sanitários (IWAKI, 2018).

Apesar de diversas pesquisas apresentarem o uso de diferentes resíduos junto com a biomassa geralmente florestal para produção de energia, o presente trabalho apresenta uma alternativa inovadora de aproveitamento de lodo flotado de efluente à biomassa de capim elefante BRS Kurumi, tendo bagaço de mandioca como aglutinante.

1.1 JUSTIFICATIVA

As indústrias de alimentos, são as que mais consomem água, principalmente os frigoríficos e abatedouros, gerando uma grande quantidade de efluentes líquidos com elevada concentração de poluentes (GARCIA, 2016).

Os abatedouros de aves caracterizam-se pelo elevado consumo de água, sendo superior a 15L por ave abatida (SILVA, 2005). Segundo Fagnani (2017) adaptado de Krieger (2007) a água é utilizada para lavagem de caminhões, escaldagem, lavagem das vísceras e carcaças, transporte de produtos e resíduos, limpeza e esterilização de equipamentos, alimentação de caldeiras e resfriamento de compressores e condensadores, promovendo alta geração de efluentes. Após sua utilização, a água contém insumos e torna-se um efluente industrial e deve ser enviada para tratamento adequado (FAGNANI, 2017).

Fagnani (2017), relata que a destinação final utilizada para o lodo é a compostagem em conjunto com outros resíduos que apresentam fontes de carbono. Contudo, ainda que a destinação seja efetuada de forma correta diante a legislação, existe a desvantagem de se transportar o lodo, desde o local gerado até o de compostagem, dessa maneira gera-se um custo elevado para a empresa geradora. Além disso, é necessária uma grande área para armazenagem e realização da compostagem, que se dá por período considerado longo, podendo variar de 90 a 180 dias para a estabilização do composto

orgânico, ocasionando um grande volume estocado (UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL, [20--]).

Perante esta situação surge a necessidade de buscar outras alternativas para utilização desse resíduo. Uma possibilidade é a utilização do lodo em combustão realizada em caldeiras, sendo utilizado em conjunto com o combustível principal na geração de vapor para a indústria (FAGNANI, 2017). Um dos tipos de combustíveis de biomassa usadas em caldeiras são os pellets.

Assim, a possibilidade de se produzir o pellet, com diversos tipos de biomassa vegetal, como resíduos de podas de árvores, serragem, subprodutos de indústrias madeireiras, bagaço da cana-de-açúcar. Por sua vez, pode-se utilizar outros tipos de materiais, como materiais lignocelulósicos de gramíneas de alta produtividade, tendo como exemplo o capim elefante BRS Kurumi (QUENÓ, 2019)

Rosa *et al.*, (2019) descrevem que o capim elefante cv. BRS Kurumi se destaca pelo elevado potencial de produção de forragem obtendo em média 30 toneladas por ano ($t.ano^{-1}$) de matéria seca (MS), com velocidade elevada de rebrota de 20 a 30 dias, além do alto poder calorífico e dos elevados teores de fibras e lignina na sua constituição. Dessa forma, torna-se uma boa alternativa para produção de pellets.

Por conseguinte, a busca cada vez maior por matéria-prima que possa servir como fonte de energia é uma motivação para o aumento do uso de materiais lignocelulósicos atrelados a resíduos para produção de biocombustíveis sólidos, utilizando de processos de conversão que potencializem a eficácia energética desse produto final (MADALENA, 2019).

1.2 OBJETIVO GERAL

A presente pesquisa tem como objetivo geral produzir pellets de capim elefante cv. BRS Kurumi com lodo flotado de efluente agroindustrial e bagaço de mandioca.

1.2.1 Objetivos Específicos

- a) Caracterizar a biomassa de capim elefante cv. BRS Kurumi, lodo flotado de efluente agroindustrial e bagaço de mandioca, quanto a teores de umidade, carbono fixo, materiais voláteis e cinzas.
- b) Produzir os pellets para as misturas de capim BRS Kurumi, lodo flotado e bagaço de mandioca.
- c) Caracterizar os pellets, quanto a teores de umidade, carbono fixo, materiais voláteis e cinzas.
- d) Estimar o Poder Calorífico Superior, Poder Calorífico Inferior e densidade energética para os pellets produzidos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 BIOMASSA

A biomassa é toda matéria orgânica, de origem animal e vegetal, podendo ser classificada de acordo com sua fonte de origem, como: madeiras e seus derivados, resíduos agrícolas, resíduos sólidos urbanos e industriais, plantas aquáticas, e também os bio-fluídos, como os óleos vegetais (mamona, soja, etc.), e, voltada para fins energéticos, abrange a utilização desses vários resíduos para a geração de fontes alternativas de energia (CORTEZ *et al.*, 2008; SANTOS *et al.*, 2017), ou seja, de acordo com a ANEEL (2008), qualquer matéria orgânica que possa ser transformado em energia mecânica, térmica ou elétrica é classificado como biomassa.

O Brasil possui situação privilegiada para produção de biomassa em larga escala, com grande potencial para desenvolver técnicas na conversão da biomassa em biocombustíveis (LENÇO, 2010).

Quando queimada como combustível é menos poluente que os combustíveis de origem fóssil, uma vez que o CO₂ liberado durante a queima já havia sido absorvido anteriormente pela biomassa durante seu processo de fotossíntese, resultando em um balanço de emissões de dióxido de carbono nulo (GUEDES *et al.*, 2010; PIRES, 2013).

A compactação da biomassa é um exemplo eficiente de conversão da biomassa onde se obtém os pellets e briquetes como produto. Esse processo possui vantagem de atingir uma combustão uniforme além da alimentação em caldeiras terem alta eficiência de queima, quando comparado ao carvão, e baixa emissão de poluentes, sendo uma opção viável para a geração de bioenergia (PIRES, 2013).

2.2 BIOMASSA PARA ENERGIA

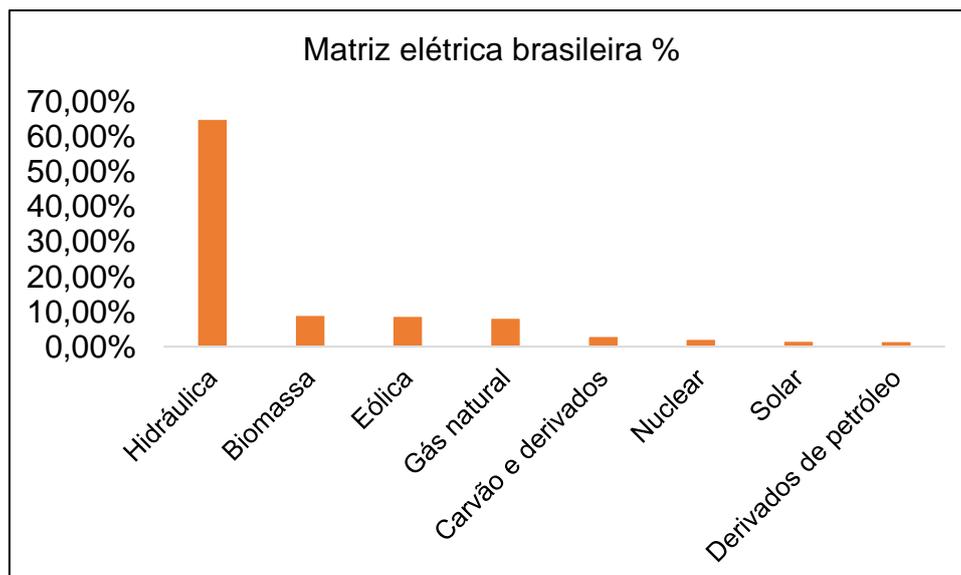
O conceito de biomassa compreende todas as matérias orgânicas utilizadas como fontes de energia, e está entre as fontes renováveis com maiores possibilidades em termos de natureza, origem, tecnologia de conversão e potencial energético, além da facilidade transporte e armazenamento, e do seu baixo custo (BIOMASSA BR, 2017; COPEL, 2016).

A energia da biomassa pode ser definida como a energia solar acumulada a partir do metabolismo da planta por meio da fotossíntese (TAIZ; ZEIGER, 2012). Portanto, à medida que o crescimento vegetal for maior em um curto período de tempo, maior será a eficiência no aproveitamento da energia solar pela planta (ALVES *et al.*, 2018).

Segundo Almeida (2020), é inquestionável a importância da energia para o desenvolvimento de um país. No Brasil, ao decorrer do crescimento populacional ocasionou uma maior utilização da energia para desempenho das suas atividades.

O país utiliza os recursos energéticos provenientes do petróleo em sua maior porcentagem na matriz energética, porém a necessidade da redução dessa matéria-prima, por uma energia renovável com menor índice de poluentes eliminados no meio ambiente, conjuntamente na produção e oferta interna de energia, sem adquirir prejuízo na economia brasileira, vem aumentando o uso de diversificadas fontes renováveis na matriz (EPE, 2021; TANABE, 2017). Assim, a matriz elétrica brasileira, formada pelo conjunto de fontes disponíveis apenas para a geração de energia elétrica (Figura 1), possui 84,8% proveniente de fontes renováveis, sendo que, a biomassa, que incluem bagaço de cana, lenha, biodiesel e lixo, é a segunda fonte mais promissora dessa matriz, ficando apenas atrás da hidráulica que é a principal fonte geradora de energia do Brasil (EPE, 2021).

FIGURA 1- PRINCIPAIS FONTES DE ENERGIA BRASILEIRA EM 2020

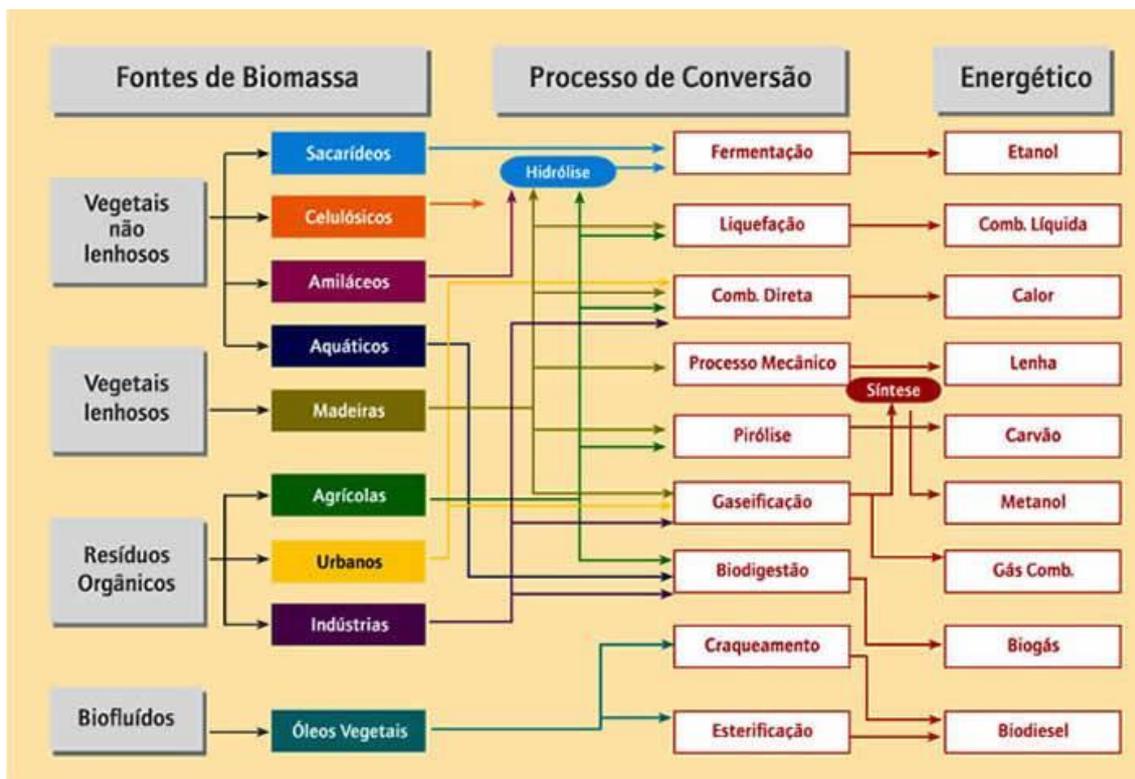


FONTE: Adaptado de EPE, (2021).

Assim, a biomassa entrou no ranking entre as primeiras e mais importantes fontes renováveis geradas no Brasil na Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE), com o consumo interno de 9,1%, superando os 8,3% de participação do gás natural (EPE, 2021; MME, 2016). Ou seja, o Brasil possui um grande potencial para produção de biomassa como fonte energética.

A biomassa energética apresenta rotas significativamente diversificadas, como observado na Figura 2, com extensa variedade de fontes, que vão desde os resíduos agrícolas, industriais e urbanos até as culturas dedicadas a energia (EPE, 2007). Para a geração de energia é necessário que a biomassa passe por alguns processos de conversão, estes variam de acordo com a sua composição e objetivo do produto final.

FIGURA 2- DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DOS PROCESSOS DE CONVERSÃO DA BIOMASSA



FONTE: EPE (2007).

É por meio da conversão de métodos biológicos, físicos ou químicos, que consegue-se transformar e potencializar a energia contida na biomassa, gerando assim, combustíveis sólidos, líquidos e gasosos, que variam desde micro até larga escala (MADALENA, 2019; CORTEZ; LORA; AYARZA, 2008).

Além da queima para a produção de eletricidade, a biomassa também é o elemento principal de vários outros tipos de combustíveis e fontes de energia. Entre eles, pode-se destacar o bio-óleo, o biogás, o BTL (Biomass-to-Liquids) e o biodiesel (ESFERA ENERGIA, 2021).

No Brasil, a lenha tem sido uma fonte de energia de grande importância, principalmente, nas residências, a queima desta matéria-prima é utilizada para cocção (cozimento), aquecimento e produção do carvão vegetal (TANABE, 2017; MADALENA, 2019 adaptado de NOGUEIRA; LORA, 2003).

De acordo com os últimos dados do Sistema Nacional e Informações Florestais – SNIF (2020), em 2017, a produção anual de briquetes, lenhas ou carvões foi de 217 toneladas, um aumento crescente ao se comparar com o ano de 2014 que foi de 74 toneladas.

Em fornos convencionais, a madeira e as biomassas cruas tem combustão incompleta, devido ao seu alto teor de umidade, o que gera fumaça, sendo prejudicial para o meio ambiente, equipamentos e para a saúde, o que leva também a uma baixa eficiência energética (GUO; SONG; BUHAIN, 2015). De acordo com Madalena (2019), adaptado de Calpea (2009), a lenha comparada com as lascas de madeira tem a desvantagem do volume que ocupa e sua impossibilidade de uso em sistemas pequenos automatizados com combustão controlada e algumas das desvantagens das lascas de madeira são suas perdas durante o armazenamento.

Quanto ao uso de forrageiras para produção de biocombustíveis, destacam-se as forrageiras como capim-elefante e seus genótipos com produção de massa seca de até 90 t (ha.ano⁻¹). Sendo assim, o capim-elefante por mostrar uma alta taxa de crescimento, conseqüentemente uma alta produção, possui um grande potencial para a finalidade energética.

Entretanto, o crescimento mais acelerado desta fonte de energia renovável depende ainda de investimentos em tecnologia e maior diversificação no aproveitamento de resíduos da biomassa (BIOMASSA BR,2016).

Resíduos como o da colheita e industrialização da cana de açúcar, o aproveitamento florestal, resíduos da colheita de safras agrícolas e até mesmo de resíduos sólidos urbanos são grandes fontes de matérias-primas para a geração de energia renovável (BIOMASSA BR,2016).

2.2.1 Os resíduos gerados a partir da biomassa

A atividade florestal gera no campo resíduos, a utilização destes como serragem, galhos, cascas, bagaço de cana, etc., funciona como alternativa energética aos combustíveis sólidos convencionais (lenha e carvão), de acordo com a Norma Brasileira 10.004 resíduos, são:

(...) resíduos nos estados sólidos e semissólidos que resultam da atividade da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Considera-se também, resíduo sólido os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornam inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d'água, ou exijam, para isso, soluções técnicas e economicamente inviáveis, em face à melhor tecnologia disponível. (ABNT NBR,2004).

Segundo dados do último panorama da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), o Brasil gerou 82,5 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos no ano de 2020, sendo que a destinação final destes resíduos é aterros sanitários e lixões, onde dificilmente este material é reaproveitado (ABRELPE, 2021).

A ideia de utilizar os resíduos para produção de energia, já é abordada a décadas, Oliveira *et al.* (2016), cita em seu trabalho um exemplo da eliminação dos resíduos e aproveitamento energético, é o primeiro incinerador para lixo da Inglaterra, de 1876, para iluminação das ruas de Londres.

Assim, os resíduos são de alto potencial energético para a produção de energia. Nas indústrias que utilizam madeira como matéria-prima, gera de 5 a 20% de resíduos, principalmente a serragem (DIAS *et al.*, 2012; KHARDIWAR *et al.*, 2013; TANABE, 2017). No Brasil, são as maiores fontes de produção de combustíveis sólidos e em muitas aplicações, tanto os briquetes quanto os pellets são considerados os substitutos diretos da lenha (DIAS *et al.*, 2012).

2.3 CAPIM-ELEFANTE

O capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) é originário da África, foi introduzido no Brasil, no início do século XX, e seu cultivo foi disseminado por todas as regiões do país por apresentar excelente adaptação ao clima tropical. A espécie possui mais de duzentas variedades, algumas de alto rendimento e de boa qualidade para uso como fonte alternativa de energia (STREZOV *et al.*, 2008; LIMA *et al.*, 2010). É uma das forrageiras mais importantes, cultivadas em quase todas as regiões tropicais e subtropicais do mundo. A espécie se destaca pelo alto potencial de produção de biomassa, um vegetal rico em fibras, especialmente lignina (MENEGAZZI, 2018).

De acordo com Rosa *et al.* (2019), adaptado de Chaves *et al.* (2013) a espécie, por ser de metabolismo C4, sustenta a demanda de alta produtividade de matéria seca, possuindo grande capacidade de fixar CO₂ atmosférico, podendo produzir até 300 toneladas de matéria verde por hectare.

Pode ser utilizado na combustão direta, queimado em forma de briquetes ou pellets, na geração de energia térmica ou elétrica, em usos agrícolas e industriais que demandem calor. Magalhães *et al.* (2016), produziu pellets com

capim elefante, encontrando bons resultados em relação a produção de energia com poder calorífico útil médio de $14,6 \text{ MJ.kg}^{-1}$, calculado através de equação, porém com baixa densidade a granel.

2.3.1 Capim Elefante cultivar BRS Kurumi

O capim elefante cultivar BRS Kurumi, foi desenvolvida pelo programa de melhoramento genético de capim-elefante da Embrapa, em 2015, originou-se do cruzamento entre as cultivares capim Merkeron de Pinda e o capim Roxo, ambas pertencentes ao Banco Ativo de Germoplasma de Capim-elefante da Embrapa (BAGCE) (EMBRAPA, 2016). De acordo com Gomide *et al.* (2015) plantas selecionadas deste híbrido foram inter cruzadas, resultando na segregação de indivíduos de porte alto e baixo. A cultivar BRS Kurumi foi obtida pela seleção e clonagem de uma das plantas de porte baixo desta progênie.

A BRS Kurumi apresenta porte baixo/anão, podendo chegar até 2 metros de altura, sendo adaptada para uso sob pastejo, touceiras semiabertas, folha e colmo de cor verde e internódio curto, conforme a Figura 3. Apresenta crescimento vegetativo vigoroso com rápida extensão foliar, sendo seu plantio realizado por meio de propagação vegetativa (estacas), a forrageira apresenta tempo de rebrota em torno de 20 a 30 dias, sendo o ideal para corte em torno de 90 dias (ROSA *et al.*, 2019; Gomide *et al.*, 2015).

FIGURA 3- CAPIM BRS KURUMI



FONTE: A autora (2022).

De acordo com Carvalho *et al.* (2016) o porte baixo do BRS Kurumi e a densidade de lâminas foliares são características desejáveis de uma forrageira para uso sob pastejo, além de trazer facilidades para manutenção de altura de manejo do pasto.

Nos estudos de Paciullo (2015), a BRS Kurumi foi avaliada sob pastejo, onde apresentou produção média de 5,19 t de MS por ciclo de pastejo. E, nos estudos conduzidos pela Embrapa Gado de Leite (2016) mostraram que a taxa de acúmulo da forrageira variou entre 120 a 170 kg MS.ha⁻¹.dia⁻¹. Já Pereira *et al.* (2017) observou que durante estação chuvosa, a forrageira atinge produções de 16,2 t de MS.ha⁻¹ de forragem e 11,1 t de MS.ha⁻¹ de folhas para o capim BRS Kurumi. Valores muito superiores aos obtidos para a cultivar Mott (outro genótipo do capim elefante), a qual apresentou produção de 7,7 t de MS.ha⁻¹ de forragem e 7,1 ton de MS.ha⁻¹ de folhas.

Assim, devido à alta produção da biomassa e pelo ciclo curto de rebrota, o capim BRS Kurumi apresenta vantagens na sua utilização para fins energéticos, através da produção de pellets ou briquetes.

2.3.2 Análise para potencial energético do capim elefante

Para que se possa utilizar a biomassa do capim elefante com a finalidade de gerar energia, é indispensável determinar a qualidade da biomassa, fazendo se necessário o conhecimento da composição química e física. Por meio de análise imediata e análise química, é possível determinar os teores de umidade, materiais voláteis, carbono fixo, poder calorífico, granulometria, teor de cinzas, além dos teores de lignina, holocelulose e celulose (LESSA, 2019; BORGES, AQUINO, EVANGELISTA, 2016).

2.3.2.1 Análise imediata do capim elefante

A análise imediata fornece resultados de umidade, teor de voláteis, cinzas e carbono fixo.

O teor de umidade é um parâmetro importante a ser analisado por apresentar uma relação inversamente proporcional ao poder calorífico (PARIGOT, 2014). Sendo assim, um alto teor de umidade dificulta a queima devido à redução do poder calorífico (BRAND, 2010). Conforme Nogueira e Lora (2003), o teor de umidade é a medida da quantidade de água livre na biomassa e que pode ser avaliada pela diferença entre pesos de uma amostra, antes e logo após ser submetida à secagem.

Os materiais voláteis desempenham um papel importante no processo de ignição e nas etapas iniciais da combustão da biomassa, pois degradam com maior facilidade colaborando com a permanência da chama da combustão (CORTEZ *et al.*, 2011).

Um maior teor de carbono fixo no material aumenta o tempo de residência e, conseqüentemente, o poder calorífico. O carbono fixo é relacionado à fração do carvão que é queimado no estado sólido, sendo representado pela massa que sobra após a liberação de compostos voláteis e sem a presença de cinzas. (MCKENDRY, 2002; LIMA, 2018).

Por sua vez, teores elevados de materiais inorgânicos, ou seja, as cinzas, implicam na redução do poder calorífico pelo fato de não participarem do processo de combustão (CHAVES *et al.*, 2013; BRAND; MUNIZ, 2010).

O poder calorífico representa a quantidade de energia por unidade de massa liberada na forma de calor durante a combustão do combustível (normalmente expressado em MJ.Kg⁻¹) (CORTEZ, 2010; LORA, 2012). Esse

parâmetro é influenciado pela umidade da amostra, ou seja, quanto menor o teor de umidade no material uma maior quantidade de energia será liberada (SCHIRMER *et al.*, 2017).

2.3.2.2 Análise química elementar do capim elefante

Na análise química elementar, 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, constituintes de alta massa molar, apresenta também em quantidades minoritárias os extrativos e compostos inorgânicos que englobam os constituintes de baixa massa molar (BRITO *et al.*, 2014; MADALENA, 2019).

De acordo com Martini (2009) a concentração da celulose é entre 40% à 50%, a hemicelulose na faixa 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% (TANABÉ, 2017).

A celulose é um polímero natural de alto peso molecular, o maior constituinte da parede celular dos vegetais e o componente mais importante. É constituída por unidades de D-Glicopiranoose, interligadas por ligações glicosídicas β 1-4 e sua porcentagem na madeira corresponde de 40-45% (MADALENA, 2019; ARAÚJO, 2017).

A lignina age como um agente protetor dos tecidos das plantas contra microrganismos, sendo que na parede celular contribui para rigidez, resistência, impermeabilidade e tem uma função adesiva entre as fibras (MADALENA, 2019). Araújo (2017), afirma que o teor de lignina apresenta relação positiva e linear entre a produção energética e o poder calorífico, significando que quanto maior for o teor de lignina, maior será o poder calorífico. Para biomassa lignocelulósica, Mckendry (2002) sugere que o percentual de lignina fique entre 10 a 25%. Já Wastowski (2018) cita teores de 27 a 33% em resinosas, 18 a 25% em madeiras folhosas e 17 a 24% em gramíneas.

A hemicelulose, é um polissacarídeo ramificado que pode ser formado por diferentes tipos de monossacarídeos, uma das suas características importantes é a facilidade a absorção de água, o que contribui para o aumento

de volume do caule das plantas, tornando as fibras mais flexíveis (NOGUEIRA, LORA; 2003). Segundo Pereira *et al.* (2013) na madeira, a hemicelulose está presente com porcentagens de 20 a 30%, e Mckendry (2002), apresenta a hemicelulose entre 20 a 40% da massa seca em biomassa lignocelulósica.

Assim, mesmo com estas três estruturas, a biomassa apresenta ainda outras quantidades menores de produtos orgânicos e inorgânicos, favorecendo o desenvolvimento de métodos da geração de combustíveis mais eficientes (TANABÉ, 2017; ABBASI, 2010).

2.4 LODO DE EFLUENTE AGROINDUSTRIAL

Dentre os problemas ambientais, agravados pelo aumento da população e conseqüentemente da industrialização, é o destino adequado para os milhões de toneladas de resíduos de efluente gerados, diariamente, em indústrias (BATISTA, 2015). O setor industrial produz um volume expressivo dos mais variados tipos de resíduos, podendo ser líquidos ou sólidos.

No Brasil segundo o IBGE (2022) são abatidos em torno de 16 milhões de aves por dia, só no ano de 2021 o país registrou o abate de 6,18 bilhões de cabeças de frango, o que gera cerca de 320 milhões de litros de água utilizada, apenas no abate por dia. Como consequência dessa operação originam-se vários subprodutos e resíduos como sangue, penas, gorduras, aparas de carne, vísceras, animais ou suas partes condenadas pela inspeção sanitária, etc. A maior parte dessa água é transformada em efluentes líquidos com alta taxa de concentração de poluentes, necessitando assim de tratamento para a minimização dos impactos ao meio ambiente (GARCIA, 2016; FAGNANI, 2017).

Além dos vários resíduos provenientes do abate, os efluentes líquidos gerados possuem ainda uma parte do residual de compostos utilizados na sanitização e desinfecção, oriundo do processo de higienização de máquinas e equipamentos (FAGNANI, 2017).

Comumente o sistema de tratamento de efluentes de frigoríficos divide-se em tratamento primário e secundário. O tratamento primário tem como objetivo remover os sólidos suspensos do efluente, os sólidos flotáveis, óleos e graxas, sendo que os sistemas mais utilizados neste tratamento são os de decantação e flotação. O tratamento secundário consiste em remover a matéria

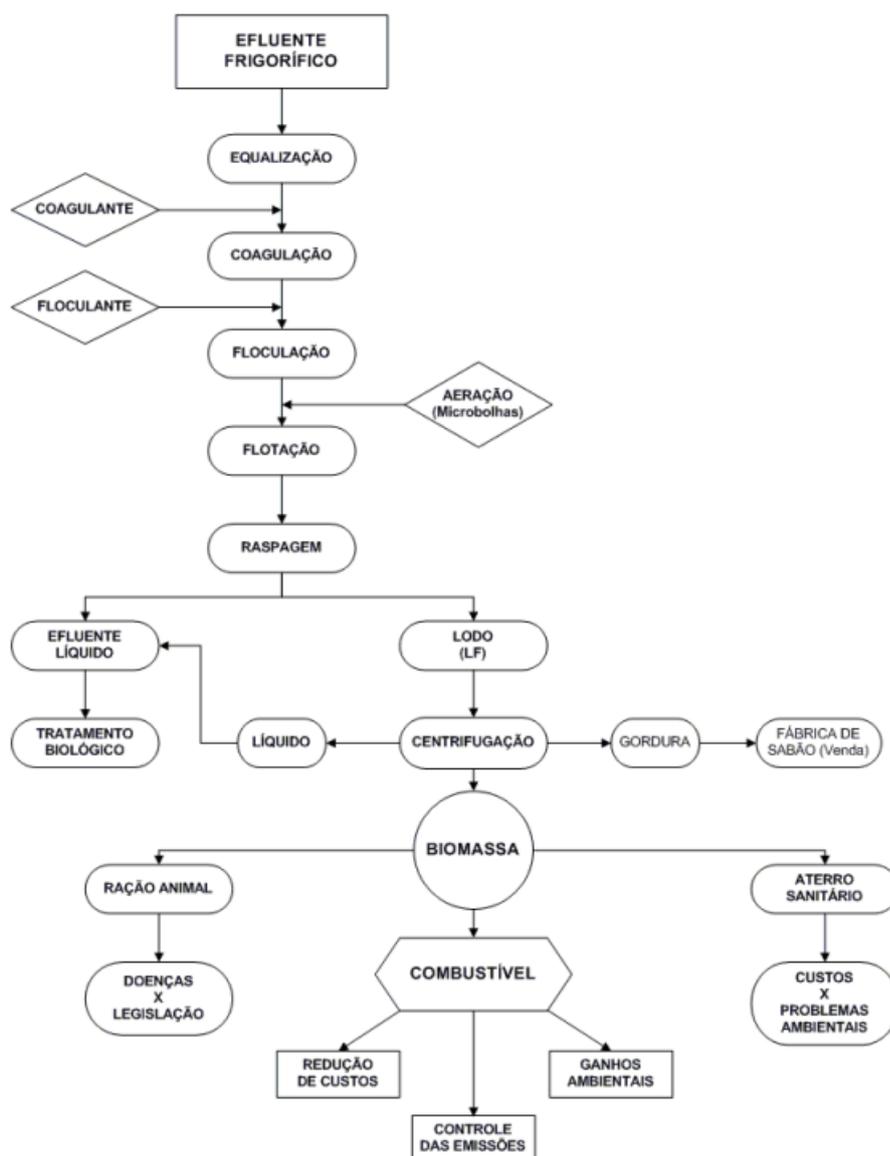
orgânica e nutrientes como nitrogênio e fósforo por meio de mecanismos biológicos, sendo o sistema utilizado composto por lagoas de estabilização ou sistema de lodos ativados (FAGNANI, 2017; GARCIA, 2016; PADILHA *et al.*, 2019).

O lodo flotado é considerado uma biomassa de alto poder calorífico, sendo obtido a partir do tratamento físico-químico do efluente por flotação simples. Segundo Garcia (2016), o processo de flotação como tratamento primário é normalmente utilizado em efluentes que apresentam alta carga de óleos e graxas suspensos como é o caso dos abatedouros e indústrias de processamento de carnes, e tem por finalidade elevar a eficiência de remoção de matéria orgânica da água.

Segundo Schatzmann (2009) a flotação tem como princípio remover o máximo de sólidos existentes no efluente por meio da adição de coagulantes e coadjuvantes de coagulação, seguida pela adesão dessas partículas às bolhas que ascendem nos tanques de flotação. E, de acordo com Fagnani (2017), sua composição é formada por todo material presente no efluente líquido que coagulou e floculou dentro do flotador, onde o lodo que, permanece flutuando, é removido por raspagem através de pás.

A Figura 4 ilustra um fluxograma do processo de tratamento primário, desde o início do tratamento até a obtenção do lodo como biomassa.

FIGURA 4- PROCESSO DE TRATAMENTO PRIMÁRIO DE EFLUENTE



FONTE: Sena (2005).

A disposição final adequada deste lodo é uma etapa problemática e apresenta um custo de até 50% dos orçamentos operacionais de um sistema de tratamento, geralmente é destinado a descarte ou a aterros sanitários, culminando por gerar resíduos indesejáveis como, por exemplo, chorume e metano (CH₄), poluindo a água, o ar e o solo, além de implicar em aumento do custo de disposição e custo de transporte para a empresa geradora (PADILHA *et al.*, 2019; GARCIA, 2016).

Para Virmond (2007) tanto o lodo, quanto a gordura líquida proveniente do processo de centrifugação do lodo flotado, são materiais com potencial para serem utilizados como fonte de energia, através da sua combustão direta.

Existem várias rotas de melhor aproveitamento deste resíduo para energia, a briquetagem e a pelletização é atualmente uma das alternativas mais viáveis técnica e economicamente para transformá-los em combustíveis com alta densidade energética competitivo perante outras fontes (GOMES, 2019).

Sena (2005) avaliou o lodo gerado no tratamento de efluentes de uma indústria de carne, obtendo $25,6 \text{ MJ.Kg}^{-1}$ de poder calorífico superior do lodo, e quando comparado com o cavaco de madeira, este apresentou um valor de 17 MJ/kg . Já Borges (2008) analisou lodo proveniente de ETE doméstico, chegando a um poder calorífico em torno de 19 MJ.kg^{-1} .

Assim, estudos vêm sendo realizados empregando o lodo flotado como biomassa combustível para geração de energia, e sua queima em caldeiras, entretanto, a Resolução N°042 da SEMA (2008), estabelece critérios para a queima de resíduos em caldeiras.

Disposto no Art. 2º, parágrafo IV descaracterização do combustível principal:

- a) por quantidade: uma mistura de resíduo com combustível principal na qual o resíduo representa uma parcela acima de 20% por peso da mistura;
- b) por poder calorífico: uma mistura de resíduo com combustível principal na qual o resíduo representa uma parcela acima de 20% do poder calorífico da mistura; (...) (SEMA,2008).

Sendo assim, o lodo flotado como um resíduo, não pode ser queimado diretamente em caldeira ou misturados a alguma biomassa principal, se houver uma parcela acima de 20% do peso ou poder calorífico, o qual chegar primeiro.

Meneghini *et al.* (2015), avaliou esta potencialidade térmica entre a mistura de lenha e lodo proveniente de frigorífico, tendo percentuais de mistura do lodo em massa de 10%, 15% e 20%, o autor concluiu que o lodo não deve ser queimado a percentuais acima de 15%, pois as emissões de gases ficaram acima dos padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA N° 382 de 2006, que

estabelece os limites máximos de emissões de poluentes atmosféricos para fontes fixas.

Segundo Fagnani (2017) adaptado de Sena *et al.* (2007) embora, o uso de lodos de estações de tratamento de efluentes como combustível alternativo na co-geração de energia vem sendo estudado por diversos autores, a técnica de aplicação ainda não é bem difundida.

2.5 BAGAÇO DE MANDIOCA

A mandioca (*Manihot esculenta Crantz*) é uma cultura de elevado interesse econômico mundial, pela sua ampla utilização na agropecuária, capacidade de adaptação à diversas condições climáticas e pela elevada produção de fécula (amido extraído) por unidade de área (CANUTO, 2006).

Segundo Miranda (2014) adaptado de Felipe *et al.* (2010) a cultura da mandioca se destaca como a principal fonte de carboidrato para mais de 925 milhões de pessoas e em 105 países das zonas tropicais e subtropicais, sendo cultivada em todos os estados brasileiros.

No processamento da mandioca, além da extração do amido, são gerados resíduos em volumes significativos, como o bagaço. O bagaço de mandioca é um resíduo sólido fibroso, gerado na etapa da separação da fécula, podendo apresentar um teor de umidade maior (cerca de 75%) do que a própria matéria-prima (NALEVAIKO *et al.*, 2021; MIRANDA, 2014; CANUTO, 2006).

Como consequência, o processamento industrial da mandioca causa sérios problemas ambientais, seu descarte se enquadra como um potencial agente poluidor ao meio ambiente (ZENATTI *et al.*, 2015). Miranda (2014), afirma que o bagaço é o principal descarte sólido produzido nas fecularias e, em geral, grande parte é deixado em valas, que por vezes extravasam e conduzem elevada carga orgânica. E, Zenatti *et al.* (2015) considera que estes resíduos sólidos, em sua maioria, são doados para a alimentação animal ou para serem utilizados como fertilizantes nas circunvizinhanças próximas as unidades de processamento.

Sendo assim, nos últimos anos tem-se estudado a transformação deste resíduo a fim de gerar subprodutos de alto valor agregado (FIORDA, 2013). Na

concepção de pellets e briquetes o bagaço de mandioca, por ser rico em amido, tem grande importância como material aglutinante (NALEVAIKO *et al.*, 2021).

E, além da atuação como agente ligante, durante o processo de peletização, o bagaço de mandioca, atua como um agente lubrificante na matriz, facilitando o fluxo da matéria-prima a ser densificada (TUMURULU, 2011; SIQUEIRA, 2017).

2.6 PELLETS

A peletização é a forma mais atual para obtenção da biomassa compactada destinada ao uso energético. O pellet é um biocombustível sólido, granulado a base de biomassa vegetal moída e compactada em alta pressão, o que permite uma elevada densidade energética, utilizando ocasionalmente algum agente aglutinante (GARCIA *et al.*, 2016b).

Segundo Quenó *et al.* (2019), adaptado de Kaliyan e Morey (2009), o calor gerado pela fricção na passagem pelos furos da matriz peletizadora provoca a transformação dos componentes lignocelulósicos, gerando um produto adensado de alto poder calorífico e boa resistência mecânica.

Para produzir o pellet, vários tipos de biomassa vegetal são utilizados, contudo a principal fonte de matéria-prima para a fabricação é a atividade florestal, como os resíduos das industriais madeireiras, a biomassa oriunda de plantações dedicadas e de curta rotação e alta produtividade, como as cultivares do capim elefante. Segundo a EMBRAPA (2012), os pellets possuem diâmetro de cerca de 6 a 16mm, diferente dos briquetes que possuem de 50 a 100mm. São utilizados em fornos de pizzarias, indústrias, queima em caldeiras, dentre outras finalidades. Assim, segundo Sawdogo *et al.* (2018) utilizá-los na produção de energia é uma forma de contribuir com a segurança energética e abordar questões ambientais.

De acordo com Muazu e Stegemann (2017) o aglutinante melhora a adesão de partículas, resistência à compressão e abrasão (desgaste da superfície do material). Os agentes ligantes mais utilizados são o amido de milho ou batata, farelo de canola, podendo ser usado até outra matéria vegetal para melhorar o processo de peletização (QUENÓ, 2019; AHN *et al.*, 2014). O agente ligante varia em função do tipo de biomassa.

Contudo, o uso de aglutinante, têm efeito negativo no seu valor calorífico, produzindo alto teor de cinza e aumentam a emissão de monóxido de carbono. Por isso, as normas limitam o uso desses agentes ao máximo de 2% a 5% da massa total do produto (TARASOV; SHAHI; LEITCH, 2013).

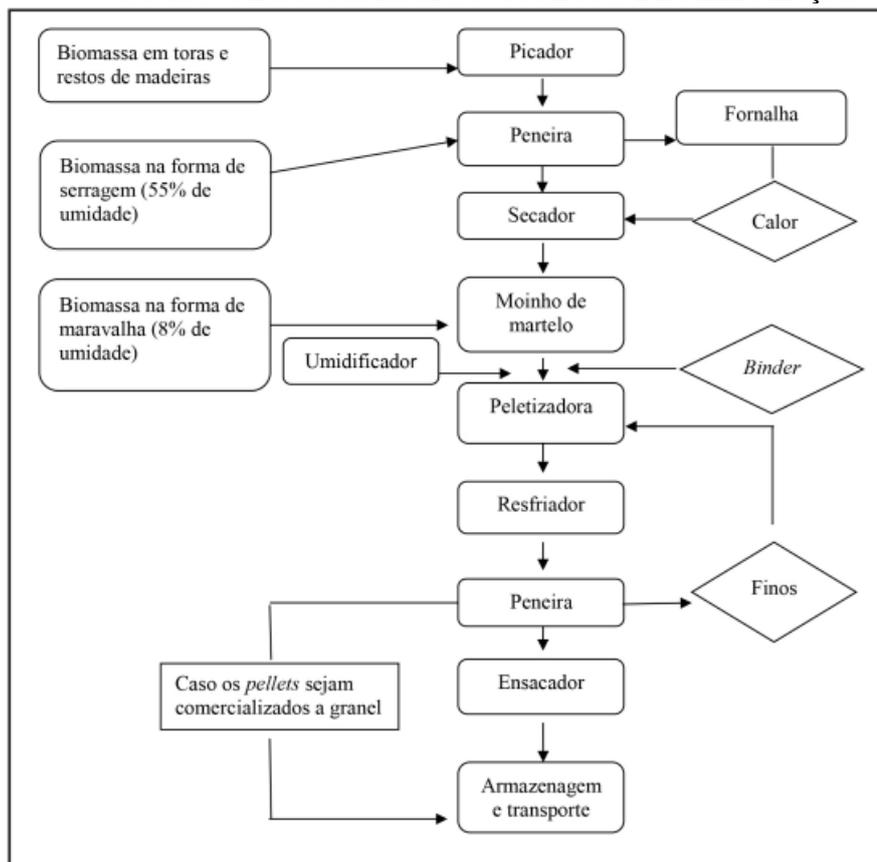
Dentre as vantagens do uso de pellets destaca-se a facilidade do transporte e armazenamento. Algumas normas servem como base para determinação da qualidade dos pellets, como a Norma Europeia EN14961-2 (DIN, 2015), que mostra parâmetros para comercialização e o sistema de certificação ENplus, que é um selo que garante que todo o processo de produção respeita controles de qualidade predefinidos, e para pellets de não madeira a normativa EM 14961-6 (DIN, 2012) (PELLET ATLAS, 2009).

O custo de produção do pellet é normalmente baixo porque é baseado no reaproveitamento de uma matéria-prima barata, feita de subprodutos que antes eram descartados. Almeida (2020), afirma que a prática de produção dos pellets é difundida no mundo todo.

O primeiro registro desta prática se dá nos anos 30, nos Estados Unidos, onde o engenheiro Robert Bowling desenvolveu um combustível barato, feito a partir da prensagem de serragens, aparas e cavacos, capaz de substituir o carvão mineral muito utilizado na época (QUÉNO, 2015; PEREIRA, 2017).

O processo de peletização engloba, segundo Rasga (2013), oito etapas na produção: armazenamento (da matéria-prima e dos pellets), limpeza, secagem, moagem, peletização, resfriamento, peneiração e distribuição. E de acordo com Quenó (2017), as operações deste processo podem ser inseridas em um fluxograma, como representado na Figura 5.

FIGURA 5- FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE PELETIZAÇÃO



FONTE: QUENÓ, 2019.

Nutrição e Saúde (2020), afirmam que entre todos esses procedimentos, a moagem, mistura e pelletização têm uma importância mais significativa no processo de produção. Mas, ainda assim, todas as etapas têm impacto similar no processo de produção dos pellets.

E também, Quenó (2015) avalia algumas características técnicas dos pellets, como o baixo teor de umidade, entre 8%, um alto poder calorífico, cerca de 17 MJ/Kg. A densidade a granel é superior a 600kg/m³, quando compara a do cavaco que apresenta de 220 a 250 kg/m³, e teor de umidade de 40% a 50%. Conseqüentemente, a densidade energética dos pellets fica mais que cinco vezes maior que a do cavaco, passando de 0,6 MWh/m³ para 3,12 MWh/m³ (QUENÓ *et al.*, 2019).

2.6.1 Mercado de Pellets no Brasil

De acordo com a Associação Brasileira das Indústrias de Pellets (ABIPEL), o país tem hoje de 16 a 20 plantas industriais. Entretanto a

associação, atualmente, é composta por 14 produtores, localizados no Sul e Sudeste do país, Figura 6.

FIGURA 6 – LOCALIZAÇÃO DAS PLANTAS DE PELLETS ASSOCIADAS NO BRASIL



FONTE: Pereira, 2017, adaptado da ABIPEL

As regiões Sul e Sudeste produzem 100% dos pellets no Brasil, propriamente porque nessas regiões se concentram 73% dos resíduos das indústrias de madeira processada, porém também é utilizado outros tipos de biomassa como bagaço de cana, casca de arroz, capim etc. (AVIZ, 2016). Outro fato da produção se concentrar no Sul e Sudeste é onde se localiza os maiores percentuais de áreas com reflorestamentos de pinus do Brasil (ABIPEL, 2015).

Segundo a ABRAF (2013) e SNIF (2020), no Brasil, uma estatística mostra que há 1,6 milhão de hectares plantados de pinus, sendo que as indústrias madeireiras que não são do ramo da produção de celulose e papel e de painéis reconstituídos consomem, anualmente, aproximadamente 27,5 milhões de m³ de madeira de pinus em tora, o que, segundo Quenó (2015) poderia representar 1,6 milhão de toneladas de pellets, produzidos somente a partir dos resíduos.

Assim, a produção brasileira de pellets cresceu ao decorrer dos anos, dados da Food and Agriculture Organization - FAO (2019), mostra que em 2017 chegou a marca de 470 mil toneladas produzidas, em comparação ao ano de 2012 que foi de 57 mil toneladas. Segundo o mesmo autor, o Brasil exportou aproximadamente 108 mil toneladas de pellets em 2017, 23% de sua produção. O maior mercado para o Brasil é a Itália, onde foi exportado quase a totalidade de produção em 2016, segundo dados fornecidos pelo SNIF (SNIF,2019). No entanto, apesar do crescimento da produção, a participação do Brasil no mercado internacional ainda é pouco significativa e representa menos de 1% do total, de acordo com Garcia et al (2017) e Garcia et al. (2018).

Segundo Quenó (2015), nas estatísticas da FAO, o Brasil aparece na 35^o colocação dos países produtores de pellets, e, Caraschi e Garcia (2012), apontam que o Brasil reúne inúmeras vantagens que o tornam capaz de atuar como líder no mercado mundial de biomassa, em particular aqueles dedicados aos pellets, no entanto esse mercado ainda é inexpressivo no país.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 COLETA E PREPARO DAS AMOSTRAS

A biomassa proveniente de capim-elefante cultivar BRS Kurumi, composta por folhas e caules (Figura 7), foi obtida a partir de um plantio com seis meses de idade, não irrigado, com espaçamento de 0,6 x 0,6 m, em uma propriedade rural na cidade de Palotina - Paraná.

FIGURA 7 – CAPIM BRS KURUMI COLETADO



FONTE: A autora (2022).

O lodo utilizado foi coletado na ETE de uma agroindústria na região oeste do Paraná, sendo 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 após o processo de centrifugação (tridecânter), separação do efluente clarificado, e o óleo ácido (Figura 8).

FIGURA 8 – LODO FLOTADO PROVENIENTE DA AGROINDUSTRIA



FONTE: A autora (2022).

O bagaço de mandioca (Figura 9) foi coletado em uma amidonaria também na região oeste do Paraná.

FIGURA 9 – BAGAÇO DE MANDIOCA COLETADO

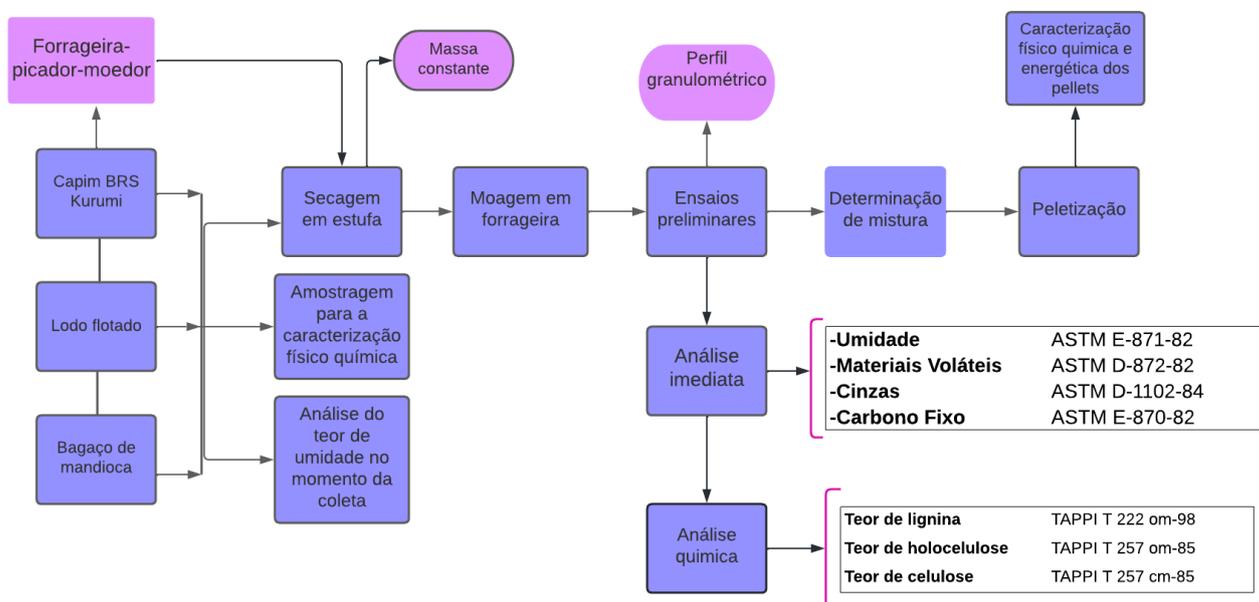


FONTE: A autora (2022).

Depois de coletado, o capim BRS Kurumi foi moído e colocado em sacos de rafia, o lodo de efluente e o bagaço de mandioca, foram postos em baldes plásticos de 20 L com tampa. Posteriormente levados até o Laboratório de Química Orgânica da UFPR – setor Palotina, para secagem dos mesmos em estufa.

Na Figura 10 pode-se visualizar o fluxograma dos procedimentos experimentais que foram realizados.

FIGURA 10 – FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DE PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS PELLETS



FONTE: A autora (2022).

O capim foi moído em forrageira-picador-moedor Dpm-4 marca Nogueira e assim como o lodo e o bagaço de mandioca foi seco em estufa a temperatura de 75 °C por aproximadamente 24 horas e na sequência foram submetidos a trituração em um triturador forrageiro da marca Tramontina TRF25 com motor 2HP e saída lateral com peneira de abertura de 3 mm (Figura 11), obtendo partículas menores (Figura 12).

FIGURA 11 - FORRAGEIRA UTILIZADA PARA MOAGEM DE MATERIAL



FONTE: A autora (2022).

FIGURA 12 – AMOSTRAS MOIDAS NA FORRAGEIRA (A) CAPIM BRS KURUMI, (B) LODO FLOTADO

(A)



(B)



FONTE: A autora (2020).

3.1.1 Determinação do teor de umidade das amostras no local de coleta

Para determinação do teor de umidade das amostras, seguiu-se conforme 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, posto em balde e misturado, de forma que se obteve uma mistura homogênea de cada parte coletada, assim, retirado uma parte e guardado em saco plástico limpo, e posteriormente enviado ao Laboratório de Química Orgânica da UFPR- Setor Palotina.

Em um béquer de 100 mL, previamente pesado, foi posto aproximadamente 2 g de cada material, e levado 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

3.1.1.1 Determinação da produção de massa seca de capim Kurumi no local de coleta

Na propriedade rural foram delimitadas duas áreas amostrais aleatoriamente de 1m², então as plantas foram cortadas a aproximadamente 5 cm do solo, pesadas e secas em estufa a 105 °C até massa constante e pesadas novamente.

3.1.2 Perfil granulométrico

A granulometria do material 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 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO LODO, CAPIM BRS KURUMI E BAGAÇO DE MANDIOCA

3.2.1 Análise imediata das matérias primas

Na análise química imediata das matérias-primas foram analisados os teores de umidade (W), materiais voláteis (TV), carbono fixo (TC) e cinzas (Cz), realizados seguindo as normas (TABELA 1) para carvões e madeiras. Todas as análises foram executadas no Laboratório de Química Orgânica da UFPR – Setor Palotina, sendo realizadas em triplicatas para as amostras.

TABELA 1 - PARÂMETROS E MÉTODOS DE ANÁLISE

Análise	Norma
Umidade	ASTM E-871-82
Voláteis	ASTM D-872-82
Cinzas	ASTM D-1102-84
Carbono Fixo	ASTM E-870-82

FONTE: A autora (2022).

3.2.1.1 Determinação da umidade

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

O teor de umidade foi obtido pela diferença entre as massas da amostra, antes e depois de à secagem, por meio da Equação 1.

$$W = \frac{m_0 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

W= teor de umidade (% b.u.);

m_0 = massa da amostra úmida (g);

m_1 = massa da amostra seca (g).

3.2.1.2 Determinação do teor de materiais voláteis

Após o procedimento anterior de 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 e pesados. O teor de voláteis determinado pela Equação 2.

$$MV = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

MV = teor de voláteis (% b.s.);

m_1 = massa da amostra seca (g);

m_2 = massa da amostra restante após decorrida a análise (massa de carbono e cinzas, em g).

3.2.1.3 Determinação do 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.

Ao final, dentro do cadinho restaram somente as cinzas resultantes da combustão dos componentes orgânicos, sendo o teor de cinzas calculado pela Equação 3.

$$Cz = \frac{m_3}{m_1} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

Cz = teor de cinzas (% b.s.);

m_1 = massa amostra seca (g);
 m_3 = massa das cinzas resultantes.

3.2.1.4 Determinação do teor de carbono fixo

A determinação do teor de carbono fixo foi obtida pela diferença entre os valores do teor de voláteis e teor de cinzas, através da Equação 4.

$$CF = \frac{m_2 - m_3}{m_1} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

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

m_1 = massa da amostra seca (g);

m_2 = massa do carbono e cinzas (g);

m_3 = massa das cinzas resultantes (g);

3.2.2 Análise química do capim BRS Kurumi

Na análise química foram analisados os teores de lignina, holocelulose e celulose, realizados conforme as normas presentes na TABELA 4. Todas as análises foram executadas no Laboratório de Química orgânica da UFPR – Setor Palotina, sendo realizadas em triplicatas para as amostras.

TABELA 2 - PARÂMETROS DE ANÁLISE QUÍMICA IMEDIATA

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 (2022).

O preparo das amostras de capim BRS Kurumi livre de extrativos para as análises consistiu em pesar 1 g de amostra para lignina e 2 g de amostra para holocelulose em envelopes feitos de papel filtro, ambas em triplicata. Os envelopes foram extraídos em conjunto Soxhlet em etanol-tolueno (1:2), e, em

seguida, em etanol, ambos por um período de 6 horas. Após o procedimento os envelopes passaram por 3 lavagens de 1h com água fervendo, posteriormente foram secas em estufa.

3.2.2.1 Determinação do teor de lignina

Em erlenmeyer de 250mL, foi pesado aproximadamente 3 mg das amostras do envelope de lignina e adicionou-se 15mL da solução de H₂SO₄ 72%, e colocados em banho de gelo a 18-20°C durante 1 hora. Em seguida, as amostras foram transferidas para um Erlenmeyer com 100 mL de água e postas em banho-maria em ebulição, e mantidas por 1 hora. Passado o período de espera as três amostras foram filtradas separadamente em papel filtro pesado, 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 5.

$$\%Lignina = \frac{\textit{peso do resíduo}}{1,0000} \times 100 \quad (5)$$

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 termoestático 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 6.

$$\%Holocelulose = \frac{\text{peso do resíduo}}{2,0000} \times 100 \quad (6)$$

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 esse processo, as amostras foram filtradas em papel filtro pesado e lavadas com 500 mL de água destilada, com 50 mL de ácido acético 1% e 50 mL de etanol. A celulose resultante foi seca em estufa a 70 °C por 12 horas, em seguida, as amostras foram colocadas no dessecador até seu resfriamento e pesadas. Para a determinação do teor de celulose, foi utilizada a Equação 7.

$$CEL = \frac{m_{cel}}{m_{holo}} \times 100 \quad (7)$$

Onde:

CEL= celulose (%);

m_{cel}= massa de celulose seca (g);

m_{holo}= massa da holocelulose seca (g).

3.3 DETERMINAÇÃO DE PROPORÇÃO DE MISTURA PARA OS PELLETS

As misturas (Tabela 3) seguiram com base nos experimentos prévios com os materiais propostos a partir da análise imediata dos materiais e análise química do capim BRS kurumi.

Ainda, para as proporções que tiveram lodo na mistura seguiram com base na resolução da SEMA nº 042/08, utilizando do seu máximo percentual permitido (20%), em relação a massa da mistura (SEMA, 2008). E, o bagaço de

mandioca, utilizado como aglutinante, tem-se o percentual de mistura de até 2 %.

TABELA 3 – DETERMINAÇÃO DA PROPORÇÃO DAS MISTURAS

	TRATAMENTOS	PROPORÇÃO DE MISTURA EM MASSA (%)
1	TK	100% Capim BRS Kurumi
2	TL	100% Lodo Flotado
3	TKL	80% Capim BRS Kurumi + 20% Lodo Flotado
4	TKLB1	79% Capim BRS Kurumi + 20% Lodo Flotado + 1% Bagaço de Mandioca
5	TKLB2	78% Capim BRS Kurumi + 20% Lodo Flotado + 2% Bagaço de Mandioca

FONTE: A autora (2022).

Para comparações pellets de 100% maravalha (AMOSTRA 6 TM) também foram analisados.

3.4 DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO

O poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) foi calculado em MJ.kg⁻¹, utilizando a correlação proposta por FAO (2012), baseando-se no teor de cinzas e umidade das amostras. Foi possível estimar o PCS e PCI para as misturas, conforme Equações 8 e 9, respectivamente:

$$PCS = 20,0 \times (1 - Cz - W) \quad (8)$$

$$PCI = 18,7 \times (1 - Cz) - (21,2 \times W) \quad (9)$$

Em que CZ é o teor de cinzas e W é o teor de umidade do combustível, determinados na análise imediata.

Algumas amostras foram feitas em duplicatas, com a utilização de bomba calorimétrica automática de marca IKA C5003 control.

3.5 PROCESSO DE PELETIZAÇÃO

O material foi compactado na empresa HMbio Energias Renováveis no distrito de Concórdia – Paraná Os pellets foram produzidos em uma prensa peletizadora da marca ATX (Figura 13), a matriz de peletização possui orifícios de abertura de 6 mm. Foram produzidos aproximadamente 10,0 kg de pellets para cada tratamento realizado.

FIGURA 13 – PELETIZADORA UTILIZADA PARA COMPACTAÇÃO DO MATERIAL



FONTE: A autora (2022).

3.5.1 Caracterização dos pellets

Para caracterização dos pellets seguiram-se as recomendações normativas conforme Tabela 5.

TABELA 4 – ANÁLISES E REFERENCIAS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS PELLETS PRODUZIDOS

Análises	Normas
Análise Imediata	ASTM D-3.172-73 até D-3175-73 (ASTM, 1983).
Densidade a granel	EN 15103 (DIN, 2010).
Densidade aparente	Protásio <i>et al.</i> (2011b).
Densidade energética	Garcia <i>et al.</i> (2018).
Estimativa do Poder Calorífico Superior	FAO (2012).
Estimativa do Poder Calorífico Inferior	FAO (2012).

FONTE: A autora (2022).

Para determinação da densidade a granel completou-se até a superfície superior de um recipiente com volume conhecido, fazendo assim a relação entre a massa e o volume, e para determinação da densidade aparente, a partir de 40 unidades de pellets foram obtidas as medidas da circunferência e altura de cada um, e através da Equação (10), é possível obter o volume das amostras, e para os resultados das densidades aparente e a granel, foi realizado através da Equação (11).

$$v = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (10)$$

$$D1 = \frac{m}{v} \quad (11)$$

Onde:

r= raio (m);

h= altura(m);

v= volume(m³);

D1= densidade a granel/aparente (Kg/m³);

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 12.

$$D2 = PCS \times D1 \quad (12)$$

Onde:

D2= densidade energética (MJ/m³);

PCS= poder calorífico (MJ/Kg);

D1= densidade aparente/ a granel (kg/m³).

3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

As variáveis analisadas foram teor de umidade, teor de carbono fixo, teor de materiais voláteis e teor de cinzas para os pellets. Os dados experimentais foram submetidos a análise de variância (ANOVA) e posterior ao Teste de Tukey a um nível de significância de 95%. O software Statistica 7.0 foi utilizado para a análise estatística.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DAS AMOSTRAS

4.1.1 Teor de umidade das amostras coletadas

Os resultados do teor de umidade das três amostras coletadas estão apresentados na Tabela 5.

TABELA 5 – TEOR DE UMIDADE DAS AMOSTRAS NO LOCAL DE COLETA

Amostras	Teor de umidade (%)
Capim BRS Kurumi	64,79 ± 1,44
Lodo flotado	92,35 ± 4,56
Bagaço de mandioca	89,88 ± 0,13

FONTE: A autora (2022).

Ambos os materiais apresentaram elevado teor de umidade. Almeida (2019), obteve resultados de 70,10 % de umidade para o lodo colido em leito de secagem de reator, e analisou também o capim elefante verde, tendo teor de umidade de 63 %. Para o bagaço de mandioca, Nalevaiko *et al.* (2021) encontrou resultados de teor de umidade *in natura* superior a 85 %.

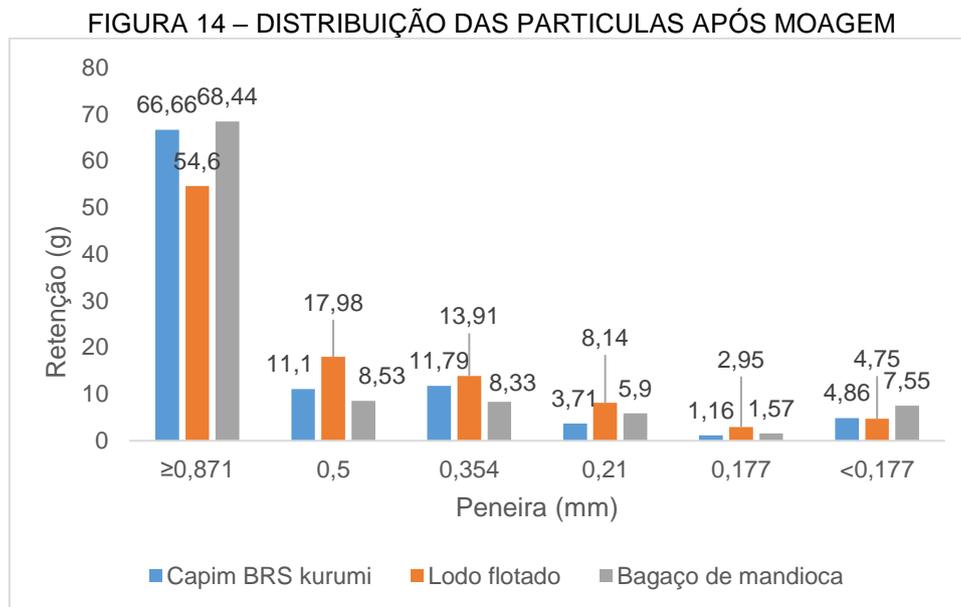
De acordo com Brand (2011) e Klautau (2008) o acúmulo de umidade prejudica a queima da biomassa, reduzindo o poder calorífico, sendo um fator limitante na qualidade da combustão da biomassa a escolha do material a ser utilizado, deve ter valores abaixo de 50 % para possuir uma quantidade de calor suficiente liberada (KLAUTAU, 2008), motivo pelo qual os materiais para serem utilizados para a combustão passam por secagem prévia quando necessário.

4.1.1.1 Produção de massa seca de capim BRS Kurumi

A produção de massa seca (MS) para o plantio de 6 meses de capim Kurumi foi de 2,603 kg MS.m⁻² equivalente a 26 t MS.ha⁻¹. Segundo a Embrapa Gado de leite (2016) a produtividade do capim Kurumi está em torno de 120 a 170 kg MS.ha⁻¹.dia⁻¹ que para um período de 6 meses equivale a 21,6 a 30,6 t MS ha⁻¹. Portanto, o material coletado possui uma produtividade condizente com aquela reportada na literatura.

4.1.2 Perfil granulométrico das amostras

A figura 14 apresenta a distribuição das partículas após análise granulométrica. Os resultados mostram que o processo de moagem resultou em partículas grandes, correspondente a peneira de 3 mm utilizada na forrageira.



FONTE: A autora (2022).

Pela disponibilidade de peneiras foi possível quantificar granulometria $\geq 0,871\text{mm}$ e $< 0,177\text{ mm}$. A maior porcentagem das amostras ficou retida na peneira de 0,871 mm, enquanto a porção mais fina do peneiramento ($< 0,177\text{ mm}$) apresentou porcentagem apenas de 4 % a 7 %.

Estudos mostram que a condição ideal é a presença de partículas de diferentes tamanhos, pois possibilita a melhora no empacotamento das partículas e contribui para a alta resistência dos pellets. Segundo Dias *et al.*, (2012) uma distribuição ampla de tamanho de partículas promove a incorporação das partículas pequenas pelas partículas de maior dimensão. Entretanto, partículas muito finas, com tamanho inferior a 1 mm, não são adequadas 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).

4.1.3 Análise imediata das amostras *in natura*

Na Tabela 6 são apresentados os valores médios em base seca para os teores de umidade, materiais voláteis, carbono fixo e cinzas obtidos a partir da análise imediata para as três amostras *in natura* capim Kurumi (K), lodo flotado (L) e bagaço de mandioca (B) e da maravalha de pinus (M) usada na empresa HMBio para a produção dos pellets comerciais.

TABELA 6 - ANÁLISE IMEDIATA DO MATERIAL SEM MISTURAS

Amostra	Umidade (%)	Materiais Voláteis (%)	Carbono Fixo (%)	Cinzas (%)
K	5,52 ± 0,25 C	70,69 ± 0,08 C	17,56 ± 0,37 A	11,74 ± 0,35 A
L	0,91 ± 0,18 D	86,73 ± 0,82 A	6,63 ± 0,32 C	6,57 ± 0,50 B
B	9,54 ± 0,03 A	85,24 ± 0,06 B	13,17 ± 0,01 B	1,59 ± 0,07 C
M	6,52 ± 0,13 B	84,80 ± 0,70 B	13,10 ± 0,86 B	2,09 ± 0,13 C

FONTE: A autora (2022). Nota: Média seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Turkey, com significância de 5% ($p < 0,05$).

A diferença da composição química entre o capim BRS Kurumi, lodo flotado, bagaço de mandioca e a maravalha é o principal fator de influência sobre os teores de umidade, materiais voláteis, carbono fixo e cinzas.

Como o teor de umidade trata-se do material seco e processado, as umidades foram reduzidas em relação aquelas verificadas quando coletadas, diferindo entre si. Para materiais voláteis o lodo apresentou o maior teor diferindo do capim Kurumi e do bagaço e maravalha que não diferiram entre si. O capim Kurumi apresentou maior teor de carbono fixo diferindo do lodo com o menor teor. O maior teor de cinzas foi observado para o capim Kurumi que diferiu dos demais.

Os valores obtidos para o capim BRS Kurumi, foram próximos ao encontrados por Lessa (2019), que analisou outras cultivares do capim elefante (Tabela 7).

TABELA 7 – VALORES DE ANÁLISE IMEDIATA DE DIFERENTES CULTIVARES DO CAPIM ELEFANTE ENCONTRADO EM LITERATURA

Cultivares	Umidade (%)	Materiais Voláteis (%)	Cinzas (%)	Carbono Fixo (%)
cv. Mott	10,47	73,36	7,90	8,28
cv. Capiáçu	9,30	74,84	6,75	7,97
cv. Roxo	9,79	68,91	7,46	14,43

FONTE: Adaptado de Lessa, 2019

Os resultados também se mostram próximos aos encontrados por Carvalho *et al.* (2017), que estudou o capim elefante verde, obtendo valores médios para teor de umidade em 12,79 %, materiais voláteis de 73,56 %, carbono fixo de 15,0 % e cinzas de 11,45 %.

Padilha *et al.* (2019) e Virmond (2007), avaliaram lodo gerado no tratamento de efluentes de abatedouro de aves, conforme Tabela 8.

TABELA 8 – RESULTADOS DE ANÁLISE IMEDIATA PARA O LODO DE EFLUENTE ENCONTRANDO EM LITERATURA

Referências	Umidade (%)	Materiais Voláteis (%)	Carbono Fixo (%)	Cinzas (%)
Padilha <i>et al.</i> (2019)	15,7	72,6	15,0	12,2
Virmond (2007)	15,0	74,80	8,40	12,30

FONTE: A autora (2022).

Os resultados obtidos se mostraram divergentes dos encontrados pelos autores, fato que pode estar relacionado com o processo de tratamento, coagulantes, forma de coleta e tratamento prévio deste lodo para análise, entre outros. Como o teor de umidade, que se apresentou abaixo dos obtidos em literatura, Meneghini *et al.*, (2015) obteve valor médio de 12,8% de umidade para o lodo seco.

O teor de materiais voláteis apresentou resultados próximos ao de Padilha *et al.* (72,6 %) e de Sena (2005) que encontrou teor de 81,3% de materiais voláteis, para lodo de frigorífico e abatedouro. Esse parâmetro representa o percentual de componentes presentes no lodo que serão volatilizados durante o processo de combustão.

A porcentagem de cinzas encontrada também se apresentou menor do que relatado em literatura, Meneghini *et al.* (2015) obteve valor de 17,5 %,

próximo ao encontrado por Padilha et al. (12,2 %), este valor elevado de cinzas é devido a maior quantidade de materiais inorgânicos, não voláteis, presentes no efluente, entretanto Sena (2005), encontrou para lodos de abatedouro e frigorífico 5 % de cinzas.

O lodo de efluente exibiu baixo valor de carbono fixo em 6,63 %, contudo os resultados observados em literatura também se mostraram baixos como o apresentado por Padilha *et al.* (15 %) e por Sena (2005) 13 %. Quando comparado com o cavaco, que atualmente, são as biomassas mais utilizadas como combustíveis em caldeiras, Fisher (2015), encontrou teor de carbono fixo de 39,59 %. O teor de carbono fixo apresenta relação inversamente proporcional ao teor de materiais voláteis.

Para o bagaço de mandioca, os resultados obtidos foram similares aos encontrados em literatura, conforme apresentados na Tabela 9.

TABELA 9 – RESULTADOS ENCONTRADOS EM LITERATURA PARA ANÁLISE IMEDIATA DO BAGAÇO DE MANDIOCA

Autores	Umidade (%)	Materiais Voláteis (%)	Carbono Fixo (%)	Cinzas (%)
Nalevaiko et al. (2021)	11,30	81,68	16,88	1,44
Pattiya et al. (2010)	8,3	71,3	16,7	3,7

FONTE: A autora (2022).

Dos valores encontrados por Zanatta (2012), de 7,6 % para umidade, 81,7 % para teor de voláteis, 9,7 % teor de carbono fixo e 1,0 % para o teor de cinzas, também se mostraram próximos aos obtidos neste estudo.

4.1.4 Análise química do capim BRS Kurumi

Na caracterização química determinou-se os teores de lignina, holocelulose, celulose e hemicelulose (Tabela 10), juntamente com os resultados disponíveis na literatura que mostram os principais componentes estruturais de amostras de diferentes cultivares do capim elefante. Sendo que a hemicelulose é obtida pela diferença entre a celulose e a holocelulose.

TABELA 10 – RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DO CAPIM BRS KURUMI

Amostra	Lignina (%)	Celulose (%)	Holocelulose (%)	Hemicelulose (%)	Autor
cv. Kurumi	4,89	46,66	58,69	12,03	A autora (2022)
cv. Mott	5,49	27,74	-	16,31	Lessa (2019)
cv. Capiáçu	11,23	34,85	-	5,46	Lessa (2019)
cv. Roxo	6,70	37,33	-	27,74	Lessa (2019)

FONTE: A autora (2022).

Os valores obtidos neste trabalho se mostram próximos aos encontrados em literatura para os diferentes tipos de cultivares do capim elefante.

Quando comparado aos tipos de madeira eucalipto e pinus (folhosas ou coníferas), estas quantidades de componentes estruturais variam. Rodrigues (2009), avaliou os dois tipos de madeira, obtendo resultados para as coníferas: 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.

Segundo Nielsen *et al.* (2009) os extrativos atuam como lubrificante durante o processo de peletização, diminuindo as exigências de energia durante a densificação da biomassa lignocelulósica. A alta temperatura empregada durante o processo de peletização faz com que a lignina se torne plástica e atue como aglutinante natural das partículas da biomassa durante a sua densificação. Desse modo, maiores teores de lignina contribuem positivamente no processo e, conseqüentemente, resultam em pellets com melhores características físicas, mecânicas e energéticas devido ao conteúdo de carbono e características químicas (PROTÁSIO *et al.*, 2013a; SILVA *et al.*, 2014).

4.2 AVALIAÇÃO DOS PELLETS PRODUZIDOS

Todos os pellets produzidos tiveram diâmetro de aproximadamente 6 mm, entretanto com variações no comprimento. Nas Figuras 15 a 19, estão ilustrados os pellets produzidos, de acordo com a determinação das proporções de misturas.

FIGURA 15 – 100% CAPIM BRS KURUMI (TK)



FONTE: A autora (2022).

FIGURA 16 – 100% LODO (TL)



FONTE: A autora (2022).

FIGURA 17 – 80% CAPIM BRS KURUMI + 20% LODO (TKL)



FONTE: A autora (2022).

FIGURA 18 – 79% CAPIM BRS KURUMI + 20% LODO + 1% BAGAÇO DE MANDIOCA (TKLB1)



FONTE: A autora (2022).

FIGURA 19 - 78% CAPIM BRS KURUMI + 20% LODO + 2% BAGAÇO DE MANDIOCA (TKLB2)



FONTE: A autora (2022).

O sistema de norma EN 14961-6 (DIN, 2012) define que o diâmetro dos pellets sejam de 6 ± 1 ou 8 ± 1 mm. Assim, todos os pellets produzidos atendem a especificação da normativa.

São apresentados na Tabela 11 os valores médios em base seca para os teores de umidade, materiais voláteis, carbono fixo e cinzas obtidos a partir da análise imediata para as 6 amostras dos pellets. Verifica-se que os valores divergem do esperado com a adição de 20 % de lodo em TKL, TKLB1 e TKLB2, principalmente no que se refere ao teor de cinzas. Uma vez que pela proporção da mistura seria esperado um teor em torno de 12 - 13%, o que indica que a peletização dos tratamentos propostos em peletizadora industrial necessitaria de uma massa superior a 10 kg devido a contaminação dos tratamentos com material do tratamento anterior processado.

TABELA 11- ANÁLISE IMEDIATA DOS PELLETS

Amostras	Umidade (%)	Materiais Voláteis (%)	Carbono Fixo (%)	Cinzas (%)
TK	$6,76 \pm 0,08$	$67,25 \pm 0,59$	$17,51 \pm 0,73$	$14,66 \pm 0,15$
TL	$0,79 \pm 0,22$	$87,30 \pm 1,01$	$6,43 \pm 0,39$	$6,25 \pm 0,61$
TKL	$5,68 \pm 0,16$	$74,56 \pm 4,26$	$18,14 \pm 3,69$	$7,28 \pm 0,67$
TKLB1	$8,50 \pm 0,07$	$70,75 \pm 0,30$	$14,12 \pm 0,54$	$15,12 \pm 0,24$
TKLB2	$5,99 \pm 0,19$	$76,10 \pm 2,52$	$14,96 \pm 2,45$	$8,92 \pm 0,12$
TM	$6,51 \pm 0,13$	$84,80 \pm 0,73$	$13,10 \pm 0,85$	$2,09 \pm 0,13$

FONTE: A autora (2022).

Os teores de umidade variaram de 0,79 % (amostra TL) a 8,50 % (amostra TKLB1). Os tratamentos que tiveram adição de aglutinante tiveram divergência quanto a umidade, sendo que na adição de 2 % de bagaço de mandioca o teor de umidade se apresentou menor 5,99 % (TKLB2), do que com

a adição de 1% de algutinante (TKLB1) de 8,50 %. Um menor teor de umidade nos pellets contribui de forma positiva para o aumento do poder calorífico.

Segundo Oliveira (2016), com base no Comitê Europeu de Normatização para biocombustíveis sólidos (certificação de pellets), o teor de umidade deve ser menor ou igual 10 % em consonância com a norma EN 1961-6 (DIN, 2012).

Para teor de voláteis, TK apresentou o menor teor 67,25 %, enquanto para TL obteve o maior valor de materiais voláteis 87,30%, e, com a adição de aglutinante, contribuiu para o aumento deste teor, em relação a TK.

Para os teores de carbono fixo as amostras variaram de 18,14 % (TKL) a 6,43 % (TL), sendo que alto teor de carbono fixo contribui para o tempo de queima e eficiência do material, e apresenta uma relação inversamente proporcional ao percentual de materiais voláteis. Assim, o baixo teor encontrando em TL, e o alto valor para TKL é relativo ao teor de materiais voláteis.

O tratamento TKLB1 apresentou o maior teor de cinzas (15,12 %), seguido de TK (14,66 %). As cinzas são materiais inertes que não produzem calor, e seu aumento diminui o poder calorífico do material. Estes maiores teores de cinzas presentes nos tratamentos são devido a sua maior quantidade de materiais inorgânicos, não voláteis, presentes no material. É notório que, quando adicionado lodo de efluente nas misturas o teor de cinzas diminuiu sendo 7,28 % para TKL e 8,92 % para TKLB2, no entanto não observado para TKLB1. Já os pellets compostos de maravalha apresentaram a menor quantidade de cinzas (2,09 %).

A norma EN 14961-6 estipula valor máximo de 10 % do teor de cinzas para pellets. Os tratamentos TK e TKLB1, não se enquadram de acordo com a norma.

Quando comparado a literatura, Magalhães *et al.* (2014) avaliou pellets produzidos a partir de capim elefante verde, obtendo valores de materiais voláteis 72,9 %, carbono fixo 16,2 % e cinzas 10,9 %. Carvalho *et al.* obteve resultados para a mesma matéria-prima em teor de umidade de 12,79 %, materiais voláteis 73,56%, carbono fixo e cinzas respectivamente 15,0 % e 11,45 %.

Almeida (2020), avaliou a produção de pellets utilizando o capim elefante verde e lodo proveniente de reator UASB com misturas de 50 % lodo e 50 %

capim e 25 % lodo e 75 % capim tendo resultados, respectivamente, de teor de umidade de 12,12 % e 10,44 %, materiais voláteis 77,63 % e 70,70 %, carbono fixo 5,86 % e 19,69 % e cinzas 16,51 % e 9,61 %.

Souza *et al.* (2020) produziu pellets com 80 % de poda urbana e 20 % de lodo de flotação, resultando em teor de umidade em 5,1 % e cinzas de 16,64 %.

Rodrigues (2021) avaliou pellets produzidos com 100 % lodo primário de indústria celulose kraft alcançando valores para teor de umidade de 6,70 %, materiais voláteis 86,43 %, carbono fixo 12,32 % e cinzas de 1,25 %.

Para pellets produzidos apenas de maravalha de pinus Camargo *et al.* (2017), obteve valores para umidade 12,36 %, materiais voláteis 80,86 %, carbono fixo 18,03 % e teor de cinzas 1,11 %.

Os resultados obtidos para análise imediata dos pellets produzidos estão próximos ao comparados com a literatura, entre os tratamentos TK destaca-se o tratamento TKL, que possuiu menor teor de cinzas e umidade, e elevado teor de carbono fixo. E quando adicionado agente aglutinante o tratamento TKLB2 apresentou resultados melhores aos demais.

4.2.1 Poder calorífico estimado dos pellets

O poder calorífico em pellets varia de acordo com o tipo de biomassa utilizado como matéria-prima no processo. Pode-se visualizar na Tabela 12 o poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) estimado para os diferentes pellets produzidos (determinado com base no teor de umidade e teor de cinzas).

Amostra	PCS [MJ/kg]	PCI [MJ/kg]
TK	15,71	14,52
TL	17,62	16,37
TKL	17,42	16,15
TKLB1	15,27	14,07
TKLB2	17,04	15,79
TM	19,04	18,04

FONTE: A autora (2022).

Tanto para PCS e PCI estimado, o maior valor médio obtido foi para o tratamento TM, de 19,04 MJ.Kg⁻¹, 18,04 MJ.Kg⁻¹ respectivamente, Camargo *et al.* (2017), obteve 20,25 MJ.Kg⁻¹ de poder calorífico superior e 18,89 MJ.Kg⁻¹ de poder calorífico inferior, para pellets de maravalha de pinus.

Entre os tratamentos TK, a adição de aglutinante aos pellets TKLB1 e TKLB2, diminuiu seu poder calorífico, ao ser comparado com TKL, entretanto a adição de 2 % de aglutinante aumentou o poder calorífico em comparação ao tratamento com apenas 1 % (TKLB1).

O menor valor apresentado por TK, $15,71 \text{ MJ.Kg}^{-1}$ (PCS) e $14,52 \text{ MJ.Kg}^{-1}$ (PCI), também pode estar relacionado ao seu baixo teor de lignina do capim elefante BRS Kurumi, uma vez que a lignina possui estrutura com maior teor de carbono que a celulose e hemicelulose. Magalhães et al. (2016) obteve poder calorífico superior de $17,9 \text{ MJ.Kg}^{-1}$ para pellets produzidos com capim elefante verde.

Em comparação com a literatura Silva (2020), elaborou pellets a partir de bagaço de cana de açúcar utilizando óleo residual como aglutinante, e obteve valores de PCS aproximadamente de 17 MJ.Kg^{-1} . Pacheco (2015) produziu pellets a partir de serragem utilizando amido de milho como aglutinante obtendo poder calorífico de $18,15 \text{ MJ.Kg}^{-1}$.

Já Rodrigues (2021) para pellets produzidos com lodo primário de indústria de celulose kraft encontrou um PCS de $17,0 \text{ MJ.Kg}^{-1}$.

Souza *et al.* (2020), produziu pellets de 80 % poda urbana com 20 % de lodo de flotação obtendo valores de PCS de $16,56 \text{ MJ.Kg}^{-1}$. Quando comparado as principais matérias-primas para geração de calor, Parikh, Channiwala e Ghosal (2005), utilizaram cavaco de pinus que obteve $20,18 \text{ MJ.Kg}^{-1}$ e casca de pinus $22,18 \text{ MJ.Kg}^{-1}$ para o PCS.

O poder calorífico superior para as amostras TK e TKL foi obtido, através de bomba calorimétrica, com valores médios para TK de $17,19 \text{ MJ.Kg}^{-1}$ e TKL $16,35 \text{ MJ.Kg}^{-1}$.

Assim, os valores obtidos através da bomba calorimétrica não se mostraram muito divergentes ao comparados com os principais combustíveis utilizados, entretanto são valores a baixos dos mesmos.

4.2.2 Densidade a granel, densidade aparente e energéticas

Segundo Oliveira (2016) a densidade aparente refere-se a massa média do sólido granulado por volume, não considerando os espaços vazios entre os grânulos. E para Garcia, Caraschi e Ventorim (2013) a densidade a granel é importante para quantificar os volumes de produtos com formas irregulares, já que considera os espaços vazios entre as partículas fornecendo dados reais dos volumes.

É possível na Tabela 13 verificar as densidades a granel, aparente e as densidades energéticas para os diferentes tratamentos.

TABELA 13 – DENSIDADE A GRANEL, APARENTE E ENERGÉTICA DOS PELLETS

Amostras	Densidade a granel [kg/m ³]	Densidade energética a granel [GJ/m ³]	Densidade aparente [kg/m ³]	Densidade energética aparente [GJ/m ³]
TK	525,36	8,25	857	13,47
TL	473,0	8,33	870	16,16
TKL	494,28	8,61	1018	17,73
TKLB1	437,52	6,68	622	9,50
TKLB2	508,02	8,65	889	15,15
TM	547,16	9,32	984	17,96

FONTE: A autora (2022).

A densidade a granel das amostras variou de 437,52 kg.m⁻³ (TKLB1) a 547,16 kg/m³ (TK). Os tratamentos TK e TM obtiveram os maiores valores de densidade a granel, o que consequentemente aumenta as suas densidades energéticas. Quanto maior for a densidade a granel dos pellets mais elevada é sua densidade energética, levando em consideração seu poder calorífico superior.

De acordo com Tumuluru *et al.* (2011), a densidade a granel de resíduos agrícolas e gramíneas variam entre 80 a 150 kg.m³ e a densidade a granel da madeira, em cavacos ou serragem, de 150 a 250 kg.m³. Sendo assim a compactação traz vantagens relacionadas ao volume e por calorífico. Entretanto a norma de pellets exige valores mínimos de 600 kg. m⁻³, logo nenhum dos tratamentos obteve valor adequado.

A densidade energética indica o potencial da biomassa em termos energéticos por unidade de volume. A amostra TKLB2 obteve maior densidade energética a granel (6,65 GJ.m⁻³).

A amostra TK apesar de obter valores elevados para densidade a granel, não obteve valores elevados para a densidade energética a granel, devido ao seu poder calorífico superior ter sido baixo.

Segundo Magalhães (2014) pellets com maior densidade energética liberam, durante a sua queima, maior quantidade de energia por unidade volumétrica, além de viabilizar o transporte dos mesmos a longas distâncias. Em comparação com a literatura (Tabela 14), os pellets produzidos se apresentaram valores próximos aos observados pelos autores.

TABELA 14 – COMPARAÇÃO DA DENSIDADE A GRANEL E ENERGÉTICA EM LITERATURA

Referencias	Material	Densidade a granel [kg/m ³]	Densidade energética [GJ/m ³]
Magalhães <i>et al.</i> (2014)	Capim Elefante verde	146,2	-
Carvalho <i>et al.</i> (2017)	Capim Elefante verde	709,0	10,175
Camargo <i>et al.</i> (2017)	Maravalha	645,6	10,58
Ozdemir <i>et al.</i>	Lodo de abatedouro de aves	790	22,71
Souza <i>et al.</i> (2020)	80%Poda urbana e 20%lodo de flotação	730,0	-
Rodrigues (2021)	Lodo primário de indústria celulose kraft	551,0	7,95
Almeida (2020)	50% Capim elefante verde e 50% Lodo reator UASB	704,9	10,36
Almeida (2020)	75% Capim elefante verde e 25% Lodo reator UASB	621,87	10,27

FONTE: A autora (2022).

Já a densidade aparente dos tratamentos TKL e TKLB2 apresentaram as maiores densidades de 1018 kg.m⁻³ e 889 kg.m⁻³ respectivamente, o que implica que com a adição de lodo de efluente nas amostras aumentou sua densidade aparente, que leva em conta a altura, diâmetro dos pellets e massa, e os mesmos tratamentos obteve valores elevados para densidade energética aparente de 17,73 GJ.m⁻³ e 15,15 GJ.m⁻³ respectivamente.

Com relação a TM, que apresentou alta densidade aparente 984 kg.m^{-3} e a maior densidade energética aparente $17,96 \text{ GJ.m}^{-3}$, devido ao elevado PCS presente na maravalha de pinus.

Kaliyan e Morey (2009), em seus trabalhos realizados, observaram que algumas variáveis (como tamanho de partícula, teor de umidade e temperatura de peletização) influenciam na densidade dos pellets produzidos.

Apesar de não atingir a densidade a granel segundo a normativa, com as densidades energéticas dos pellets produzidos, observados neste trabalho, e, com os observados em literatura, é possível considerar que TKLB2 foi melhor que TKLB1.

5 CONCLUSÃO

O teor de umidade para as biomassas e a distribuição granulométrica após preparação (secagem e moagem) estava em conformidade para realizar a compactação do material, de modo que foi possível realizar a peletização para os tratamentos propostos (TK, TKL, TKLB1, TKLB2 e TL).

A compactação das biomassas puras para a produção dos pellets, capim Kurumi (TK), lodo (TL) e a própria maravalha (TM), não apresentaram variações consideráveis nos seus constituintes, uma vez que a compactação não altera as características químicas.

A peletização dos tratamentos propostos em peletizadora industrial necessitaria de uma massa superior a 10 kg devido a contaminação dos tratamentos com material do tratamento anterior processado.

Pelos resultados obtidos a adição de lodo ao capim Kurumi proporcionou redução no teor de cinzas 14,66 % (TK) para 7,28 % (TKL), característica importante devido a contribuição negativa para o poder calorífico e para prevenção de corrosão em queimadores.

Visualmente a adição de bagaço de mandioca ao capim Kurumi e ao lodo, nas condições de umidade, granulometria e equipamento utilizado não contribuiu para a agregação das partículas, confirmado pela densidade, onde o tratamento TKL apresentou maior densidade aparente e maior densidade energética. No entanto, a adição de 2 % do bagaço de mandioca (TKLB2), se apresentou melhor do que para o tratamento com 1 % (TKLB1).

De modo geral, todos os tratamentos propostos são possíveis de serem realizados e mais características podem e devem ser investigadas.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros tem-se a realização de uma análise mais detalhada dos pellets produzidos, além de um estudo sobre a viabilidade econômica de produção dos pellets. É importante também, aprofundar análises relacionadas a queima, gases produzidos na combustão, contaminantes ambientais nas cinzas entre outros que visem a viabilidade técnica e ambiental.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Carlos André Silvestre Medeiros de. **Prospecção do lodo de ETE com capim elefante e óleo de cozinha residual como alternativa energética de pellets**. 2020. 69 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2020.

AHN, B. J. et al. Effect of binders on the durability of wood pellets fabricated from *Larix kaemferi* C. and *Liriodendron tulipifera* L. sawdust. **Renewable Energy**, Amsterdam, v. 62, p. 18-23, 2014.

ALVES, Francisco Gleyson da Silveira *et al.* ELEPHANT GRASS: a bioenergetic resource. **Nucleus Animalium**, [S.L.], v. 10, n. 2, p. 117-130, 30 nov. 2018. Fundação Educacional de Ituverava. <http://dx.doi.org/10.3738/21751463.3032>.

ANDERSON CARLOS MARAFON *et al.* **Briquetagem da biomassa do capim-elefante variedade Madeira com diferentes granulometrias de partículas**: Comunicado técnico, 238. Aracajú: EMBRAPA, 2020.

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Atlas de energia elétrica do Brasil**, Brasília: Aneel, 3. ed., 2008. 236 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF. **Anuário estatístico ABRAF 2013**. Ano base 2012. ABRAF: Brasília, 2013.148 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020/2021**. São Paulo, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE PELLETS – ABIPEL. Disponível em: <http://www.abipel.com.br/>. Acesso em 23 mar. 2022

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Resíduos sólidos: Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT. 2004. 71 p. Disponível em: <https://analiticaqmcredutos.paginas.ufsc.br/files/2014/07/Nbr-10004-2004-Classificacao-De-Residuos-Solidos.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 09898**: Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

AVIZ, Paulo Gomes de. **ANÁLISE DE MERCADO DE PELLETS DE MADEIRA NO BRASIL**. 2016. 41 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Industrial Madeireira, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

BATISTA, L. F. **LODOS GERADOS NAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS NO DISTRITO FEDERAL: UM ESTUDO DE SUA APTIDÃO PARA O CONDICIONAMENTO, UTILIZAÇÃO E DISPOSIÇÃO FINAL**. 2015. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 2015.

BIOMASSA BR - ENERGIAS RENOVÁVEIS. **Saiba mais sobre Biomassa a energia do presente brasileiro e mundial.** Ago. 2017. Disponível em: <<http://www.biomassabr.com/bio/biomassabr.asp>>. Acesso em: 20 mar. 2022.

BIOMASSA BR – ENERGIAS RENOVAVEIS. **Geração com Biomassa cresce na matriz energética.** Publicado em: 03 jan. 2016 Disponível em: <http://www.biomassabr.com/bio/resultadonoticias.asp?id=3905>. Acesso em: 23 mar. 2022.

BORGES, Laylson da Silva; AQUINO, Flávio Carvalho de; EVANGELISTA, Amauri Felipe. Potencial do capim elefante para geração de bioenergia - revisão. **NutriTime**, Viçosa, ed. 01, ano 2016, n. 13, p. 4518-4523, jan/fev. 2016.

BORGES, F. **Caracterização e estudo da potencialidade de lodos de efluentes domésticos e industrial como combustível na geração de energia.** 2008. 72f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade da Região de Joinville, Joinville.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução n. 316**, de 29 de outubro de 2002. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 20 nov. 2002. Seção 1, p. 92-95

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

BRITO, R. F.; STANGERLIN, D. M.; CALEGARI, L.; PARIZ, E.; CALEGARI, C. C. A.; GATTO, D. A. Influência da variação axial, radial e granulométrica da serragem na composição química da madeira de Jurema-Preta. **Revista de Ciência de Madeira**, v. 5, n. 2, p.111-117, nov. 2014.

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.

CALPEA. **Wood burning handbook.** N. 0911-019. Sacramento, CA: California Environmental Protection Agency, 2009.

CAMARGO, B. S. *et al.* Análise de pellets de madeira produzidos a partir de diferentes composições. **ConBRepro**, Ponta Grossa, 06/12/2017 Trabalho apresentado no VIIº Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, Ponta Grossa, 2017.

CANUTO, A. P. **DESENVOLVIMENTO DE BIOPROCESSO PARA PRODUÇÃO DE GOMA XANTANA POR FERMENTAÇÃO NO ESTADO SÓLIDO A PARTIR DE RESÍDUOS E SUBPRODUTOS AGROINDUSTRIAIS.** 2016. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Processos Biotecnológicos, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

CARVALHO, P. C. F et al. Como a estrutura do pasto influencia o animal em pastejo? Exemplificando as interações planta-animal sob as bases e

fundamentos do Pastoreio “Rotatínuo”. VIII SIMFOR – Simpósio sobre Manejo estratégico da pastagem, **Anais...Viçosa – MG**, 2016.

CARVALHO, A. C. *et al.* PRODUÇÃO DE PELLETS DE CAPIM ELEFANTE (*Pennisetum purpureum* Schum). **CONIDIS**, Campina Grande, Trabalho apresentado no 2º Congresso internacional da diversidade do semiárido, Campina Grande, 2017.

CARASCHI, José Cláudio; GARCIA, Dorival Pinheiro. As indústrias de pellets no Brasil. **Revista da Madeira**, UNESP, ed. 133, 1 dez. 2012. Disponível em: http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1634&subject=Pellets&title=As. Acesso em: 24 mar. 2022.

CHAVES, C. S.; GOMIDE, C. A. M.; RIBEIRO, K. G.; PACIULO, D. S. C.; LEDO, F. J. S.; COSTA, I. DEA.; CAMPANA, L. L. Forage production of elephant grass under intermitente stocking. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 48, n. 2, p. 234-240, 2013.

COPEL. **BIOMASSA**. Curitiba: COPEL, 2016. Disponível em: <https://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2F24349F1A246428e1032574240049F201>. Acesso em: 13 abr. 2022.

CORTEZ, Luís Augusto Barbosa *et al* (org.). **Biomassa para energia**. Campinas-Sp: Unicamp, 2008.

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

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; AYARZA, J. A. C. Biomassa no Brasil e no mundo. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. (Org.). **Biomassa para energia**. Campinas/SP: Unicamp, p.15-62, 2008.

DALLAGO, R., DAMASCENO, S., MEES, J. B. R., ASSIS, T. M., HASAN, S. D. M., KUNZ, A. Nitrification and desnitrification of a poultry slaughterhouse wastewater according to cycle time and ammoniacal nitrogen concentration using surface response methodology. **International Journal of Food, Agriculture and Environment**, v. 10, n. 2, p.856-860, 2012.

DENG *et al.*, Application of boundary electro-osmotic pulse to reduce sludge-to-wall adhesion. **Water Research**, v.195, 2021, pág. 116982.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Cultivar de capim-elefante BRS Kurumi é apresentada na Tecnofam 2016**, Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2016. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/12394204/cultivar-de-capim-elefante-brs-kurumi--e-apresentada-na-tecnofam-2016#:~:text=Desenvolvida%20pelo%20Programa%20de%20Melhoramento,e%20excelente%20desempenho%20por%20animal.>> Acesso em: 14 fev 2022.

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

DIN CERTCO. **Certification scheme wood pellets for use in small furnaces – DINplus.** Berlim, Junho de 2015.

DIN - DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **EN 14961-6: Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 6: Non-woody pellets for non-industrial use.** Berlim: CEN: 16 p. 2012.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA -EPE: **Balço Energético Nacional: relatório síntese 2021 ano base 2020,** Brasília, Ministério de Minas e Energias, 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Matriz Energética e Elétrica.** 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 18 mai. 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Plano Nacional de Energia 2030:** geração termelétrica - biomassa. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2007. 12 v.

ENERGÊS. 10 PERGUNTAS SOBRE A BIOMASSA. *In:* Joires. **Energês a linguagem da energia.** [S.l.]. 5 jul. 2020. Disponível em: <https://energes.com.br/10-perguntas-sobre-a-biomassa/>. Acesso em: 21 mar. 2022.

ENERGIA, Portal. Biocombustíveis vantagens e desvantagens. *In:* Portal Energia. **Portal Energia: Energias Renováveis.** [S.l.]. 31 jan. 2019. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/biocombustiveis-vantagens-e-desvantagens/#:~:text=Os%20biocombust%C3%ADveis%20gasosos%20t%C3%AAm%20origem,esta%20mistura%20denominada%20por%20biog%C3%A1s>. Acesso em: 21 mar. 2022.

ESFERA ENERGIA. **Entenda o que é energia de biomassa e seu papel na matriz energética brasileira.** 2021. Disponível em: <https://esferaenergia.com.br/blog/energia-biomassa/>. Acesso em: 20 mar. 2022.

FAGNANI, K. C. **COMPARAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO LODO GERADO NO TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO DE EFLUENTES PROVENIENTES DO ABATE DE AVES UTILIZANDO DIFERENTES COAGULANTES.** 2017. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia em Bioprodutos Agroindustriais, Universidade Federal do Paraná, Palotina, 2017.

FERREIRA, Omar Campos. **Biocombustíveis Líquidos no Brasil.** 2008. Disponível em: https://ecen.com/eee74/eee74p/biocombustiveis_liquidos_no_brasil.htm. Acesso em: 21 mar. 2022.

FERREIRA, AGMAR. **ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA UTILIZAÇÃO DO LODO FLOTADO PROVENIENTE DO TRATAMENTO DE EFLUENTES DE UM FRIGORÍFICO DE AVES COMO BIOMASSA PARA PRODUÇÃO DE VAPOR**. 2016. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologias de Bioprodutos Agroindustriais, Universidade Federal do Paraná, Palotina, 2016.

FIORDA, F. A. et al. Farinha de bagaço de mandioca: aproveitamento de subproduto e comparação com fécula de mandioca. **Ciência e tecnologia de alimentos**. Goiânia, v. 3, n. 4, p.408-416, 2013. DOI: 10.1590/S1983-40632013000400005.

FISCHER, S. O. **Avaliação do potencial de uso de lodo têxtil como biomassa combustível para geração de energia**. 2015. 69f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade da Região de Joinville, Joinville.

Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO. **Statistics Division Forestry Production and Trade**. Roma: FAO, [2019]. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>. Acesso em: 24 mar. 2022.

GARCIA, D. P. et al. Trends and challenges of brazilian pellets industry originated from agroforestry. **Cerne**, Lavras, v. 22, n. 3, jul./set. 2016.

GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G. O setor de pellets de madeira no Brasil. **Ciência da Madeira**, v. 8, p. 21-28, 2017.

GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G.; VIEIRA, F. H. A.; PROTÁSIO, T.P. Comparative energy properties of torrefied pellets in relation to pine and elephant grass pellets. **Bioresources**, v.13 (2): 2898-2906, 2018.

GARCIA, NATALIA NUNES. **USO DO LODO DE FLOTADOR DE ABATEDOURO DE AVES NA PRODUÇÃO DE BIOCHAR**. 2016. 43 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2016.

GARCIA, Dorival Pinheiro; CARASCHI, José Cláudio; VENTORIM, Gustavo. Caracterização energética de pellets de madeira. **Revista da Madeira**, São Paulo: REMADE, ed. 135, ano 2013, mai. 2013.

GHEORGE IWAKI. **Portal tratamento de água**. Destinação Final de Lodos de ETAs e ETEs. São Paulo: Portal Tratamento de Água, 2018. Tratamento de Esgoto. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/artigo/destinacao-final-de-lodos-de-et-as-e-et-es/>. Acesso em: 19 mai. 2018.

GOLD ENERGY. **Biocombustíveis Líquidos**. 20---. Disponível em: <https://goldenergy.pt/glossario/biocombustiveis-liquidos/>. Acesso em: 21 mar. 2022.

GOMES, LÍDIA DE ASSIS. **APROVEITAMENTO DO LODO GERADO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO E A RELAÇÃO COM O MEIO AMBIENTE**. 2019. 41 f. TCC (Graduação) - Curso de Produção e Gestão do Ambiente Construído, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

GOMIDE, C.A. DE M.; PACIULLO, D.S.C.; LÉDO, F.J. DA S.; PEREIRA, A. VANDER; MORENZ, M.J.F.; BRIGHENTI, A.M. Informações sobre a cultivar de capim-elefante BRS Kurumi. **EMBRAPA** (INFOTECA-E), p.4, 2015a.

Governo do Brasil (GOV). Ministério de Minas e Energia. **Biocombustíveis**. 2020. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/qualidade-de-produtos/biocombustiveis>. Acesso em: 21 mar. 2022.

GUEDES, C. L. B. et al. Avaliação de biocombustíveis derivado do bio-óleo obtido por pirólise rápida de biomassa lignocelulósica como aditivo para gasolina. **Química Nova**, São Paulo, v.33, n.4, p.781-786, 2010.

IBEIRO, L. S. **Caracterização de resíduo de indústria de papel para utilização como material geotécnico**. Dissertação (mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

IBGE- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **IBGE**. Abate de frangos e suínos bate recorde e o de bovinos volta a cair em 2021. Estatísticas Econômicas, 2022. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/33210-abate-de-frangos-e-suinos-bate-recorde-e-o-de-bovinos-volta-a-cair-em-2021>. Acesso em: 6 abr. 2022.

IMAI, MARIANA HARUMI. **APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO LODO DE ETEI DE INDÚSTRIA DE PAPEL NO MUNICÍPIO DE CORREIA PINTO/SC**. 2010. 39 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

IWAKI, Gheorge. Destinação Final de Lodos de ETAs e ETEs. **Scientech Ambiental**, São Paulo: Portal Tratamento de Água, 2018, 19 mai. 2018.

JORDÃO, E.P., Pessôa, C.A. (2005). **Tratamento de Esgotos Domésticos**, 4ª ed, Rio de Janeiro: SEGRAC.

KALIYAN, N.; MOREY, V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. **Biomass & Bioenergy**, Amsterdam, v. 33, p. 337-359, 2009.

KRIEGER, E. I. F. **Avaliação do Consumo de Água, racionalização do uso e reúso do efluente líquido de frigorífico de suínas na busca sustentabilidade socioambiental da empresa**. Tese de doutorado do Instituto de Biociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

LENÇO, P. C. **Caracterização do bagaço de cana-de-açúcar para geração de energia**. 2010. 181 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Capinas, 2010.

LESSA, Mayara de Oliveira. **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.

LIMA, R. N. **AValiação DO POTENCIAL ENERGÉTICO DA PALHA E TALO DA CARNAÚBA**. 2018. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

LIMA, E. S.; SILVA, J. F. C.; VÁSQUEZ, H. M.; ANDRADE, E. N. et al. Características agronômicas e nutritivas das principais cultivares de capim-elefante do Brasil. **Veterinária e Zootecnia**, v. 17, n. 3, p. 324- 334, 2010.

LIMA, Juscileia de Souza *et al.* Produção e avaliação de briquetes de capim elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) cultivados com doses de nitrogênio. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, [S.L.], v. 11, n. 1, p. 29, 27 set. 2016. Grupo Verde de Agroecologia e Abelhas. <http://dx.doi.org/10.18378/rvads.v11i2.4468>.

LORA, E. E. S.; ANDRADE, R. V.; ÁNGEL, J. D. M.; et al. Gaseificação e pirólise para a conversão da biomassa em eletricidade e biocombustíveis. LORA, EE S.; VENTURINI, OJ (Coords.). **Biocombustíveis**. Rio de Janeiro: Interciência, v. 1, p. 411–493, 2012.

MADALENA, Lilian Cristina de Souza. **ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA E ENERGÉTICA DE BRIQUETES DE FEIJÃO GUANDU (*Cajanus cajan*) SILG 2009 SUBMETIDOS À TORREFAÇÃO**. 2019. 90 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2019.

MAGALHÕES, Mateus Alves de *et al.* Caracterização de pellets produzidos a partir de capim-elefante para uso energético. **Brazilian Journal of Wood Science**, Viçosa, v. 7, n. 3, p. 155-162, 2016.

MARTINI, P. R. R. **Conversão Pirolítica de Bagaço Residual da Indústria de Suco de Laranja e Caracterização Química dos Produtos**. 2009. Dissertação (mestrado em química) PPGQ, UFSM, Santa Maria: 2009.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. Rev. **Bioresource Technology**, 1 ed., v. 83, p. 37-46, maio 2002. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852401001183>>. Acesso em: 23 mar.2022.

MENEGAZZI, A. **POTENCIAL PRODUTIVO DE CULTIVARES DE CAPIM ELEFANTE (*Pennisetum purpureum*) NO NOROESTE GAÚCHO**. 2018. TCC (Graduação) - Curso de Agronomia, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2018.

MENEGHINI, C.; PROINELLI R.; PINTRO D. A B. Avaliação técnica e econômica da co-combustão de lodo frigorífico primário para geração de vapor. 2015. 7f. **VI Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental** - Universidade do Oeste de Santa Catarina, Porto Alegre.

MENEGHINI, Cristiano; PROINELLI, Renan Fabrício. ANÁLISE DE VIABILIDADE DA QUEIMA DE LODO FRIGORÍFICO EM UMA CALDEIRA À LENHA. **Unoesc & Ciência**, Joaçaba: ACET, p. 7-14, 2015.

Ministério de Minas e Energia - MME. **Plano Nacional de Eficiência Energética** – biomassa é a segunda maior fonte de energia. MME, 2016.

MIRANDA, J. C. **BIOCONVERSÃO ENERGÉTICA DA FOLHA E BAGAÇO DE MANDIOCA PLEO FUNGO *Rhizopus oligosporus* PARA OBTENÇÃO DE ALIMENTO FUNCIONAL**. 2014. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Biológicas - (Microbiologia Aplicada), Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro, 2014.

MOREIRA, Jane Mary Targino. **ALTERNATIVAS DE APROVEITAMENTO DO LODO GERADO NA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO PAJUÇARA, MARACANAÚ - CE**. 2018. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Especialização em Elaboração e Gerenciamento de Projetos Para A Gestão Municipal de Recursos Hídricos, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, 2018.

NALEVAIKO, Jaqueline Zanovelli *et al.* UTILIZAÇÃO DE SUBPRODUTOS AGROINDUSTRIAIS NA PRODUÇÃO DE BRIQUETES. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, [S.L.], v. 15, n. 1, p. 1-26, 20 abr. 2021. Universidade Federal do Paraná- Campus de Palotina. <http://dx.doi.org/10.18011/bioeng2021v15n1p1-26>.

NIEDZIÓŁKA, Ignacy *et al.* Assessment of the energetic and mechanical properties of pellets produced from agricultural biomass. **Renewable Energy**, Polónia, v. 76, p. 312-317, abr. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.040>.

NIELSEN, N. P. K. *et al.* Effect of extractives and storage on the pelletizing process of sawdust. **Fuel**, Copenhagen, v. 89, n. 1, p. 94-98, 2009.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. 2 ed., Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 200 p.

NUTRIÇÃO E SAÚDE ANIMAL. **Ferraz**. Entenda como é o processo de fabricação de rações na prática. Ribeirão Preto: Ferraz, 2020. Disponível em: <https://www.ferrazmaquinas.com.br/conteudo/entenda-como-e-o-processo-de-fabricacao-de-racoes-na-pratica.html>. Acesso em: 9 mar. 2020.

OLIVEIRA, Tiago Luís *et al.* Study of biomass applied to a cogeneration system: A steelmaking industry case. **Applied Thermal Engineering**, Minas Gerais: Elsevier, ed. 80, ano 2015, p. 269-278, 5 abr. 2015.

OLIVEIRA, SONIA VALLE WALTER BORGES DE; FERREIRA, ALESSANDRA HENRIQUES; OLIVEIRA, MARCIO MATTOS BORGES DE. Aproveitamento de resíduos para geração de energia: ecoeficiência e sustentabilidade. **ENGEMA**, USP, Trabalho apresentado no XIIº ENGEMA, São Paulo, 2016.

OZDEMIR, Saim *et al.* Investigation of poultry slaughterhouse waste stream to produce bio-fuel for internal utilization. **Renewable Energy**, Turkey: Elsevier, ano 2022, n. 190, p. 274-282,

PACIULLO, D. S. C. **Características do pasto e desempenho de novilhas leiteiras em pastagem de capim-elefante cv. BRS Kurumi**. Embrapa Gado de Leite-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E), 2015.

PACHECO, JOSUÉ FERNANDO TOJES. **CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DEL DENSIFICADO DE ASERRÍN COMO UN BIOCOMBUSTIBLE, PELLET, UTILIZANDO TRES DIFERENTES AGLUTINANTES: ARCILLA, ALMIDÓN Y YESO**. 2015. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ingeniería Química, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2015.

PADILHA, Jociéle *et al.* Avaliação da potencialidade energética de lodos gerados no tratamento de efluentes de abatedouro e frigorífico de aves. **SWAN**, São Paulo: Portal Tratamento de Água, 29 out. 2019.

PARIGOT, PEDRO. **RELAÇÃO ENTRE A UMIDADE E O PODER CALORÍFICO DA BIOMASSA UTILIZADA NA COCELPA**. 2014. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Industrial Madeireira, o Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

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

PATTIYA, A.; TITILLOYE J. O.; BRIDGWATER, A. V. Evaluation of catalytic pyrolysis of cassava rhizome by principal component analysis. **Fuel**, v. 89, p. 244-253, 2010.

PELLET ATLAS. Advancement of pellets-related European standards. Munich:WIP Renewable Energies, 2009. 26 p. Disponível em: <<https://wayback.archive-it.org/12090/20210201143503/https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/>>. Acesso em: 23 mar. 2022.

PEREIRA, A. VANDER; LÉDO, F.J. DA S.; MACHADO, J.C. BRS Kurumi and BRS Capiçu - New elephant grass cultivars for grazing and cut-and-carry system. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v.17, p.59–62, 2017.

PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. de C. O.; CARVALHO, A. M. M. L; TRUGILHO, P. F.; MELO, I. C. N. A.; OLIVEIRA, A. O.; Estudo da degradação térmica da madeira Eucalyptus através da Termogravimetria e calorimetria. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 37, n. 3, p.567-576, 2013.

PEREIRA, ARTHUR SANTOS. **USO DE PELLETS DE MADEIRA PARA FINS ENERGÉTICOS: PESQUISA DE MERCADO**. 2017. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Floresta, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

PIRES, A. A. F. **Resíduos Lignocelulósicos Para Biocombustíveis Sólidos: Caracterização e Termogravimetria Aplicada**. 2013. 102 f. Dissertação

(Mestrado) - Curso de Ciências dos Materiais, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2013.

PROTÁSIO, T. P. et al. Clones comerciais de Eucalyptus de diferentes idades para uso bioenergético da madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 101, p. 113- 127, 2014.

PROTÁSIO, T. P. et al. Seleção de clones de Eucalyptus para a produção de carvão vegetal e bioenergia por meio de técnicas univariadas e multivariadas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 97, p. 15-28, 2013b.

QUÉNO, Laurent Roger Marie *et al.* Aspectos técnicos da produção de pellets de madeira. **Ciência Florestal**, [S.L.], v. 29, n. 3, p. 1478-1489, 30 set. 2019. Universidade Federal de Santa Maria. <http://dx.doi.org/10.5902/1980509820606>.

QUÉNO, L. R. M. **Produção de pellets de madeira no Brasil: estratégia, custo e risco do investimento**. 2015. 152 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

RODRIGUES, B. V. C. **PRODUÇÃO DE PELLETS UTILIZANDO LODO PRIMÁRIO GERADO NA INDÚSTRIA DE CELULOSE KRAFT**. 2020. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2020.

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.

ROSA, Patrícia Pinto da *et al.* Características do Capim Elefante Pennisetum purpureum (Schumach) e suas novas cultivares BRS Kurumi e BRS Capião. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre: PAG, v. 25, p. 70-84, 2019.

SANTOS, Guilherme Henrique Fávero *et al.* BIOMASSA COMO ENERGIA RENOVÁVEL NO BRASI. **Uningá**, Maringá, v. 29, n. 2, p. 06-13, jan-mar. 2017.

SAOSEE, P.; SAJJAKULNUKIT, B.; H.GHEEWALA, S. Environmental externalities of wood pellets from fast-growing and para-rubber trees for sustainable energy production: A case in Thailand. **Energy Conversion and Management: X**, Elsevier, v. 14, 22 jan. 2022.

SAWADOGO, M.; TCHINI, S.; TANOAH,J.; SIDIBRÉ,S.; KPAI,N.; TANKOANO, I. Cleaner production in Burkina Faso: Case study of fuel briquettes made from cashew industry waste. **Journal of Cleaner Production**, v.195, p.1047-1056, 2018.

SCHIRMER, W. N.; FERREIRA, I. T. M.; RIBEIRO, C. B.; et al. Caracterização de biomassa residual de fábrica de papel-cartão para aproveitamento energético. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 10, n. 4, p. 1113, 2017.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE - SEMA. Constituição (2008). Resolução nº 042, de 22 de julho de 2008. **Estabelece Critérios Para A Queima de Resíduos em Caldeiras e Dá Outras Providências**. Curitiba, 25 jul. 2008.

SEMA - Secretaria do Meio Ambiente. **Resolução Nº042**: Estabelece critérios para a queima de resíduos em caldeiras e dá outras providências. PARANÁ: O Secretário de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. 2008. 10 p.

SENA, R. F. **Avaliação da biomassa obtida pela otimização da flotação de efluentes da indústria de carnes para geração de energia**. 2005. 83f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

SERVIÇO NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS- SNIF. **Produção florestal**. Brasília: SNIF, 2019. Disponível em: <https://snif.florestal.gov.br/pt-br/estatisticas-florestais>. Acesso em: 24 mar. 2022.

SILVA, H. L. B. **Uso de membranas microporosas no tratamento de efluentes de um frigorífico de abate de aves**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

SILVA, S. B. **Caracterização de pellets de diferentes biomassas para fins energéticos**. 2016. 46 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2016.

SILVA, John Lennon Willy da. **Otimização dos pellets de bagaço de cana-de-açúcar utilizando óleo de fritura residual como agente aglutinante e pós-tratamento por torrefação**. 2020. TCC (Graduação) - Curso de Licenciatura em Química, Universidade Federal de Alagoas, Arapiraca, 2020.

SIQUEIRA, H. F. D. **EFEITO DE ADITIVOS NA QUALIDADE DE PELLETS DE MADEIRA PARA USO ENERGÉTICO**. 2017. 77 f. v. 43, Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES FLORESTAIS – SNIF. **Produção Florestal – Produtos Madeiros**. Fev. 2020. Disponível em: <https://snif.florestal.gov.br/pt-br/produtos-florestais-nao-madeiros-exportacao/96-producao-economia-e-mercado-florestal/dados-complementares-pnm/294-produtos-madeiros-painel-interativo> . Acesso em: 20 mar. 2022.

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. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2318-2881.2020.003.0008>

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2012, 848p.

TANABE, ALEXANDER MITSUYOSHI. **CAPIM ELEFANTE COMO UMA FONTE RENOVÁVEL PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA**. 2017. Dissertação (Mestrado) - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOENERGIA, UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ, Toledo, 2017.

TARASOV, D.; SHAHI, C.; LEITCH, M. Effect of additives on wood pellet physical and thermal characteristics: a review. **International Scholarly Research Notices Forestry**, London, v. 2013, ID 876939, 6 p.

TRABALLI, Rogerio Carlos; MAKIYA, Ieda Kanashiro. ENERGIA A PARTIR DE LODO DE ESGOTO E RESÍDUOS SÓLIDOS. **ENEGEP**, Salvador, Trabalho apresentado no XXIX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, Salvador, 2009.

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

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL (UCS). **COMPOSTAGEM**: Produção de fertilizantes a partir de resíduos orgânicos. Caxias do Sul: FAPERGS, [20--]. Disponível em: <https://www.ucs.br/site/midia/arquivos/cartilha-agricultores-compostagem.pdf>. Acesso em: 9 mar. 2022.

VIRMOND, E. **Aproveitamento do lodo de tratamento primário de efluentes de um frigorífico como fonte de energia**. Dissertação de Mestrado Engenharia Química Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2007.

VISENTIN, Roseli *et al.* VIABILIDADE ECONÔMICA DA COMPOSTAGEM DO LODO DE ESGOTO PARA USO AGRÍCOLA. **HOLOS**, São Paulo: ENVIRONMENT, ano 2020, n. 2, p. 152-167, 19 fev. 2020.

WASTOWSKI, A. D. **Química da madeira**. Rio de Janeiro, RJ: Interciência, 1 ed., 2018, 584 p.

ZANATTA, E. R. Estudo Cinético da Pirolise das biomassas: Bagaço de mandioca, Casca de soja e Bagaço de Cana. **Unioeste**. Toledo, 2012.

ZENATTI, D. C.; COSTA, A. A.; HERMES, E.; VILVERT, R. M.; DIAS, L. C. Quantificação de açúcares redutores em hidrolisado do bagaço da mandioca para uso na produção de metano. **Revista gestão e sustentabilidade ambiental**. Florianópolis, n. esp, p.616-627, 2015.