

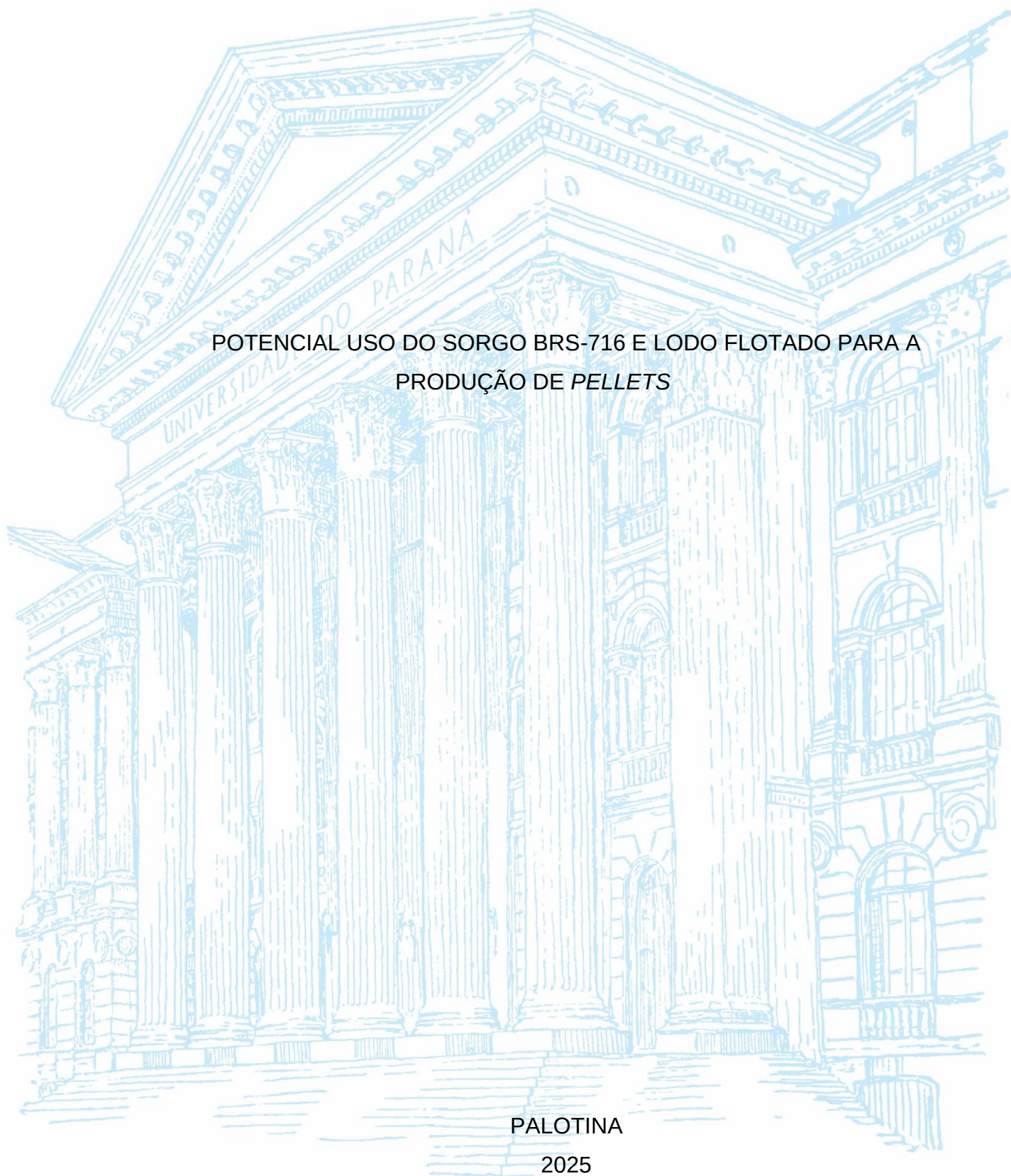
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARIA EDUARDA DE FREITAS URBANJOS

POTENCIAL USO DO SORGO BRS-716 E LODO FLOTADO PARA A
PRODUÇÃO DE PELLETS

PALOTINA

2025



Maria Eduarda de Freitas Urbanjos

POTENCIAL USO DO SORGO BRS-716 E LODO FLOTADO PARA A
PRODUÇÃO DE *PELLETS*

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

Orientadora: Prof(a). Dr(a). Adriana Ferla de Oliveira.

PALOTINA

2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ATA DE REUNIÃO

Aos vinte sete dias do mês de junho do ano de 2025, das 8h15min às 10h18min, na sala 2 do bloco 1, compareceram para defesa pública do Trabalho de Conclusão de Curso, requisito obrigatório para a obtenção do título de Engenheiro de Energia a aluna Maria Eduarda de Freitas Urbanjos, tendo como Título do Trabalho de Conclusão de Curso "Potencial uso do Sorgo BRS-716 e lodo flotado para produção de pellets". Constituíram a Banca Examinadora os professores: Profa. Dra. Adriana Ferla de Oliveira (Orientador e Presidente da Banca) e Prof. Dr. Joel Gustavo Teleken e a técnica de laboratório de química: Ms. Aline Bavaresco dos Santos. A orientadora e Presidente da Banca concedeu a palavra ao discente, para exposição do seu trabalho. A seguir, foi concedida a palavra em ordem sucessiva aos membros da Banca de Exame, os quais passaram a arguir o discente. Ultimada a defesa, que se desenvolveu nos termos normativos, a Banca de Exame, em sessão secreta, passou aos trabalhos de julgamento, tendo atribuído ao discente as seguintes notas: **Profa. Dra. Adriana Ferla de Oliveira, nota: 90 (noventa), Prof. Dr. Joel Gustavo Teleken, nota: 90 (noventa), e Ms. Aline Bavaresco dos Santos, nota: 90 (noventa)**. A nota final do discente, após a média aritmética dos três membros da banca de exame, foi **90 (noventa)** considerando a discente **APROVADA**. As considerações e sugestões feitas pela Banca de Exame deverão ser atendidas pelo discente sob acompanhamento de seu orientador. Nada mais havendo a tratar foi lavrada a presente ata, que, lida e aprovada, vai por todos assinada eletronicamente.

Título do trabalho: Potencial uso do Sorgo BRS-716 e lodo flotado para produção de pellets

Acadêmico (a): **Maria Eduarda de Freitas Urbanjos**



Documento assinado eletronicamente por **ADRIANA FERLA DE OLIVEIRA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/06/2025, às 13:35, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **ALINE BAVARESCO DOS SANTOS, TECNICO DE LABORATORIO AREA**, em 27/06/2025, às 14:03, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **JOEL GUSTAVO TELEKEN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/06/2025, às 14:19, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar forças, sabedoria e serenidade ao longo de toda essa caminhada. Sem Ele, nada disso teria sido possível. A Ele, minha eterna gratidão.

À minha família, que sempre esteve ao meu lado nos momentos bons e difíceis, deixo um agradecimento especial. Aos meus pais, Zé e Kelly, por todo o amor, apoio e confiança em cada passo que dei. À minha irmã, Maria Clara, por sua presença constante, que sempre me fortaleceu.

Ao meu noivo, Artur, minha gratidão por todo o carinho, paciência e incentivo, e por ter me ajudado ativamente na secagem e organização dos materiais do experimento. Sua presença fez toda a diferença nesse processo.

À professora Dra. Adriana, minha orientadora, sou imensamente grata por sua dedicação, paciência e apoio durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Sua orientação foi fundamental para a realização deste projeto, e sua forma acolhedora de ensinar me ajudou a crescer não apenas como estudante, mas como pessoa.

Aos colegas de curso Pedro, David e Vitor, agradeço pela amizade, pelas trocas de conhecimento e pela ajuda nas análises experimentais. Compartilhar essa etapa com vocês foi essencial. Também deixo meu agradecimento a todos os técnicos da faculdade, que sempre se mostraram solícitos e contribuíram de forma prática e eficiente para a realização das atividades.

A todos que, de alguma forma, fizeram parte dessa trajetória, o meu mais sincero agradecimento.

“E tudo que pedireis em oração crendo, o recebereis.” (Mateus 21:22)

RESUMO

Este trabalho avaliou o potencial de utilização do sorgo BRS-716 e do lodo flotado oriundo de agroindústria de transformação proteína animal como matérias-primas para a produção de *pellets*, visando a geração de energia térmica de forma sustentável. A pesquisa envolveu a coleta, preparo, caracterização físico-química dessas biomassas, seguidas da peletização em dois tipos de tratamentos com variações na granulometria do sorgo, sendo assim testadas duas granulometrias distintas, obtidas a partir de diferentes níveis de moagem, com o objetivo de observar seus efeitos sobre a compactação e qualidade final dos *pellets*. Os resultados indicaram que o sorgo, especialmente em sua forma mais fina, apresentou melhor desempenho na formação dos *pellets*, com menor teor de finos e maior durabilidade mecânica. O *pellet* no qual possui uma porcentagem de lodo, por sua vez, apresentou alto teor de cinzas, afetando a coesão e a resistência dos *pellets*. Os valores de poder calorífico variaram entre 16,77 e 18,19 MJ/kg, demonstrando viabilidade energética, mesmo com a inclusão de 20% de lodo. Embora os *pellets* não tenham atendido integralmente às normas da ABNT, os resultados indicam viabilidade técnica e ambiental da proposta, com potencial para otimização em estudos futuros.

Palavras-chave: Biomassa; Energia renovável; Sorgo BRS-716; Lodo flotado; Granulometria; *Pellets*.

ABSTRACT

This study evaluated the potential use of BRS-716 sorghum and floated sludge from the animal protein processing agroindustry as raw materials for pellet production, aiming at the sustainable generation of thermal energy. The research involved the collection, preparation, and physicochemical characterization of these biomasses, followed by pelletization under two treatment conditions with variations in the sorghum particle size. Two distinct particle sizes, obtained through different grinding levels, were tested to observe their effects on pellet compaction and final quality. The results indicated that sorghum, especially in its finer form, showed better performance in *pellet* formation, with lower fines content and greater mechanical durability. The *pellets* containing a percentage of sludge, in turn, showed high ash content, which affected their cohesion and strength. The calorific values ranged from 16.77 to 18.19 MJ/kg, demonstrating energy viability even with the inclusion of 20% sludge. Although the pellets did not fully meet ABNT standards, the results indicate the technical and environmental feasibility of the proposal, with potential for optimization in future studies.

Keywords: Biomass; Renewable energy; BRS-716 sorghum; Flotated sludge; Particle size; *Pellets*.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: EVOLUÇÃO DA PARTICIPAÇÃO DAS FONTES RENOVÁVEIS NA OFERTA INTERNA DE ENERGIA (OIE)	20
FIGURA 2: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DOS PROCESSOS DE CONVERSÃO DA BIOMASSA	21
FIGURA 3: SORGO BIOMASSA BRS - 716	24
FIGURA 4: EQUIVALÊNCIA ENERGÉTICA, EM VOLUME (m ³), ENTRE OS COMBUSTÍVEIS CAVACO DE MADEIRA, SORGO-BIOMASSA DENSIFICADO E MADEIRA DENSIFICADA.	26
FIGURA 5: PROCESSO DE TRATAMENTO PRIMARIO DE EFLUENTES	28
FIGURA 6: MODELO DE PELETIZADORA DE MATRIZ CILÍNDRICA (ESQUERDA) E MATRIZ PLANA (DIREITA)	31
FIGURA 7: ETAPAS DA PRODUÇÃO DE <i>PELLETS</i>	31
FIGURA 8: SORGO BRS-716 COM 6 MESES DE IDADE	36
FIGURA 9: COLETA DO SORGO	36
FIGURA 10: PREPARAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA (SORGO)	36
FIGURA 11 : COLETA DE LODO	37
FIGURA 12 : FLUXOGRAMA DAS METODOLOGIAS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS <i>PELLETS</i>	39
FIGURA 13: MATRIZ PELETIZADORA DA HMBIO.....	43
FIGURA 14: ANÁLISE TEOR DE FINOS	45
FIGURA 15: PROCEDIMENTO DURABILIDADE MECÂNICA	46
FIGURA 16: TRATAMENTOS TSa E TSb RESPECTIVAMENTE	53
FIGURA 17: TRATAMENTO TSL20a E TSL20b RESPECTIVAMENTE.....	54
FIGURA 18: CARACTERISTICA DOS <i>PELLETS</i>	58

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1: UMIDADE NO MOMENTO DA COLETA	49
GRÁFICO 2: GRANULOMETRIA.....	51
GRÁFICO 3: CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA.....	55

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – PARÂMETROS DE QUALIDADE PARA A CLASSIFICAÇÃO DE <i>PELLETS</i> DE PINUS, SEGUNDO A ABNT NBR 17013:2022	33
--	----

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – VARIÁVEIS ENERGÉTICAS E ECONÔMICAS DO CAVACO DE MADEIRA, SORGO-BIOMASSA DENSIFICADO E MADEIRA DENSIFICADA.	25
TABELA 2 -COMPOSIÇÃO DOS TRATAMENTOS PRODUZIDOS	35
TABELA 3 - COMPOSIÇÃO DOS TRATAMENTOS PRODUZIDOS	43
TABELA 4 - ANÁLISES E REFERENCIAS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS <i>PELLETS</i> PRODUZIDOS.....	44
TABELA 5 - CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA (LIGNINA)	52
TABELA 6 - ANÁLISE IMEDIATA	52
TABELA 7 – UMIDADE <i>PELLETS</i>	54
TABELA 8 – ANÁLISES <i>PELLETS</i>	56

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
BRS	- Identificação dos materiais provenientes do programa de melhoramento genético da Embrapa
CEL	- Celulose
CF	- Carbono Fixo
CZ	- Teor de Cinzas
DE	- Densidade Energética
EMBRAPA	- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPE	- Empresa de Pesquisa
ETE	- Estação de Tratamento de Efluentes
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LF	- Lodo Flotado
MS	- Matéria Seca
MV	- Teor de Materiais Voláteis
OIEE	- Oferta Interna de Energia Elétrica
PC	- Poder Calorífico
PCI	- Poder Calorífico Inferior
PCS	- Poder Calorífico Superior
TF	- Teor de Finos
W	- Teor de Umidade

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 PROBLEMA	16
1.2 OBJETIVOS	16
1.2.1 Objetivo geral	16
1.2.2 Objetivos específicos.....	16
1.3 JUSTIFICATIVA	17
2 REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1 BIOMASSA.....	19
2.2 BIOMASSA PARA ENERGIA.....	19
2.2.1 Caracterização Imediata de Biomassa.....	21
2.2.1.1 Poder Calorífico	22
2.2.1.2 Análise Química.....	23
2.3 SORGO	24
2.4 LODO DE EFLUENTE AGROINDUSTRIAL.....	26
2.5 <i>PELLETS</i>	30
2.5.1 Produção de <i>Pellets</i>	30
2.5.2 Mercado de <i>Pellets</i> no Brasil.....	32
2.5.3 Normativa	32
3 MATERIAL E MÉTODOS	35
3.1 COLETA E PREPARO DAS AMOSTRAS.....	35
3.1.1 Determinação do teor de umidade no momento da coleta.....	37
3.1.2 Perfil granulométrico.....	37
3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA.....	40
3.2.1 Determinação do Teor de Lignina	40
3.2.2 Análise imediata	40
3.2.2.1 Determinação do teor de umidade (W).....	41
3.2.2.2 Determinação de materiais voláteis (MV)	41
3.2.2.3 Determinação do Teor de Cinzas (CZ)	42
3.2.2.4 Determinação de Carbono Fixo (CF).....	42
3.3 PROCESSO DE PELETIZAÇÃO	42
3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS <i>PELLETS</i>	44
3.4.1 Teor de umidade	44

3.4.2 Determinação do Poder Calorífico Superior	44
3.4.3 Teor de finos	45
3.4.4 Durabilidade Mecânica	46
3.4.5 Comprimento e Diâmetro médio	46
3.4.6 Densidade a Granel	47
3.4.7 Densidade Aparente Energética	47
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	49
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA	49
4.1.1 Umidade	49
4.1.2 Caracterização Granulométrica	50
4.1.3 Caracterização físico-química	51
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS PELLETS	53
4.2.1 Poder Calorífico Superior (PCS)	56
4.2.2 Densidade e densidade energética	57
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	61
REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

A busca por fontes renováveis de energia tem ganhado cada vez mais força em todo o mundo, e com ela cresce também o interesse por biocombustíveis sólidos, como os *pellets* e briquetes. Segundo Silva (2022), esses produtos, feitos a partir da compactação de diferentes tipos de biomassa — geralmente resíduos agrícolas e florestais — vêm se destacando como uma alternativa promissora e sustentável. O Brasil, que já ocupa posição de destaque na produção de biocombustíveis líquidos como o etanol e o biodiesel, tem grande potencial para se tornar um protagonista também, desde que conte com políticas públicas adequadas para incentivar seu desenvolvimento.

A biomassa representa cerca de 8,4% da matriz elétrica brasileira, enquanto o gás natural corresponde a 9% e as hidrelétricas seguem como a principal fonte, com 55% da oferta nacional de energia (ANEEL, 2024). Apesar disso, a energia proveniente da biomassa é vista como uma das que mais podem crescer nos próximos anos. Por ser uma fonte de carbono neutro, com abundante disponibilidade de matéria-prima e relativa facilidade de implantação, ela se apresenta como uma das opções mais viáveis para um futuro energético mais limpo e sustentável. Além disso, tem o potencial de contribuir para o desenvolvimento social e econômico de maneira equilibrada (EPE, 2018).

Entre as diversas culturas com potencial energético, o sorgo-biomassa se destaca por sua produtividade e adaptabilidade. Segundo Parrella *et al.* (2010), essa planta pode produzir até 50 toneladas de matéria seca por hectare, atingindo até 5 metros de altura. É uma cultura mecanizável do plantio à colheita, propagada por sementes, com boa tolerância à seca e excelente adaptação a regiões tropicais e temperadas. Sua biomassa pode ser utilizada diretamente na queima em fornos e caldeiras, o que a torna ainda mais interessante do ponto de vista energético.

No entanto, quando se pensa em armazenamento ou transporte da biomassa, surge a necessidade de melhorar suas características físicas. É nesse ponto que entra a peletização — um processo de compactação que facilita o manuseio, transporte e aproveitamento energético da biomassa. Como afirma Tolmasquim (2016), a densificação é uma estratégia eficiente para ampliar o uso da biomassa como fonte energética, tornando-a mais acessível e viável em diferentes contextos.

1.1 PROBLEMA

Com o avanço da busca por fontes de energia limpas e sustentáveis, a valorização de resíduos e o uso de biomassas alternativas têm ganhado espaço nas discussões sobre o futuro energético. No entanto, muitos resíduos orgânicos, como o lodo flotado proveniente de estações de tratamento de efluentes, ainda são pouco aproveitados, sendo muitas vezes descartados sem qualquer tipo de reaproveitamento. Ao mesmo tempo, culturas como o sorgo-biomassa, que possuem alto rendimento e bom potencial energético, ainda são pouco exploradas na forma de biocombustíveis sólidos, como os *pellets*.

Nesse contexto, este trabalho busca compreender se é possível transformar materiais no qual são descartados em uma fonte energética viável. A questão central é entender se a produção de *pellets* a partir da mistura de sorgo-biomassa com lodo flotado pode resultar em um produto com características adequadas para o uso energético, contribuindo com soluções mais sustentáveis e eficientes.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Este estudo tem como objetivo avaliar as características químicas e físicas dos *pellets* produzidos a partir da biomassa do Sorgo BRS-716 somado a diferentes proporções de lodo flotado gerado no tratamento de efluentes de agroindústria de transformação de proteína de aves e peixes.

1.2.2 Objetivos específicos

Avaliar as características químicas e físico-químicas do Sorgo BRS-716 e os *pellets* produzidos a partir da inclusão do lodo flotado.

- Avaliar os efeitos da peletização nos *pellets* pela densidade aparente, a granel e energética nos *pellets* produzidos.
- Avaliar se os *pellets* atendem aos parâmetros estabelecidos pela norma NBR17013-1;

1.3 JUSTIFICATIVA

A geração de lodo flotado nas agroindústrias de processamento de aves e peixes representa um desafio tanto econômico quanto ambiental. Os resíduos animais podem contaminar o solo, lagos, córregos e rios, por intermédio da infiltração dessa água residuária para o lençol freático; a proliferação de parasitas, como as moscas, e a produção de gases de péssimo odor, são alguns problemas de poluição ambiental provocado por esses dejetos (CAMPOS et al., 2002). Além disso, a decomposição do lodo libera gases nocivos, que podem impactar ecossistemas naturais e habitats locais. Do ponto de vista econômico, as indústrias enfrentam custos altos relacionados ao manuseio do lodo flotado, incluindo despesas com transporte, tratamento e o cumprimento das normas ambientais.

Nessas circunstâncias, a busca por alternativas que viabilizem economicamente e ambientalmente torna-se essencial. Estratégias inovadoras, como a transformação do lodo flotado em *pellets* para a geração de energia térmica, surgem como soluções promissoras. Sendo esta, uma tecnologia com muitas vantagens, visto que os *pellets* tem como características alta densidade energética e elevado poder calorífico.

Dentre as fontes de energia renovável, a biomassa tem ganhado destaque desde a década de 1970, como alternativa ao esgotamento das fontes fósseis e aos impactos ambientais associados (Santos et al., 2013). A biomassa utilizada para geração de energia por combustão é classificada como biocombustível, sendo que uma das formas mais comuns de obtenção de biocombustíveis sólidos é a peletização de resíduos lignocelulósicos, como os gerados pela indústria madeireira (Garcia et al., 2013).

No Brasil, a principal matéria-prima utilizada nesse processo provém de resíduos florestais, especialmente a maravalha de madeira de pinus, concentrada nas regiões Sul e Sudeste. A ampliação do uso de outras fontes de biomassa, como o lodo industrial, pode viabilizar o aproveitamento de resíduos gerados em diferentes setores, agregando valor e promovendo consistência térmica na geração de energia (Orellana, 2019).

A incorporação do sorgo BRS-716 na composição dos *pellets*, em conjunto com o lodo flotado, contribui para a diversificação da matriz energética nacional. Essa

cultura apresenta baixo custo de produção e se mostra uma alternativa viável e sustentável para o aproveitamento energético.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 BIOMASSA

A biomassa é toda matéria orgânica de origem animal ou vegetal, podendo ser classificada de acordo com sua fonte, 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.) voltada para fins energéticos, abrange a utilização desses vários resíduos para a geração de fontes alternativas de energia (Cortez, 2008; Santos, 2017).

Já EMBRAPA, 2016 as classificam como: vegetações aquáticas ou terrestres, biomassa virgem, lixo orgânico, resíduos da agricultura, esterco de animais até resíduos industriais.

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).

2.2 BIOMASSA PARA ENERGIA

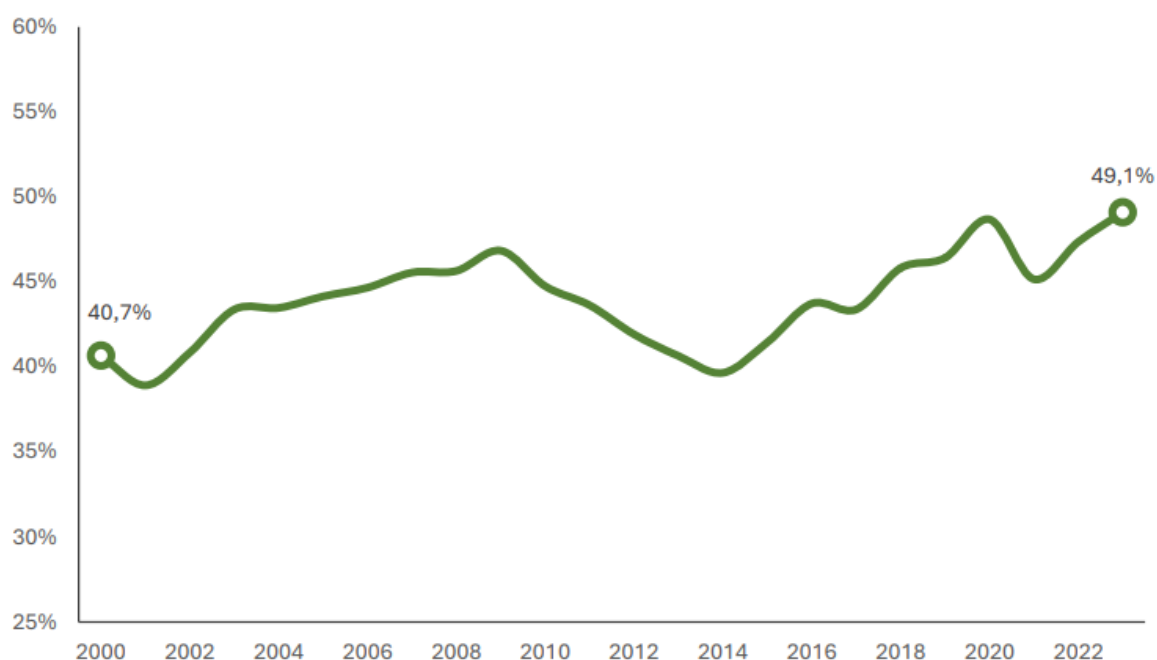
A biomassa florestal tem sido utilizada como fonte de energia desde os primórdios da humanidade, com sua importância aumentando significativamente durante a Revolução Industrial, quando a energia passou a ser um fator essencial para o crescimento econômico (Santos, 2013).

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética EPE (2021), em 2020 a biomassa ocupou a quarta posição entre as fontes de geração de energia elétrica na Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE), sendo responsável por 55.613 GWh, o que corresponde a 9% do total. As três primeiras posições foram ocupadas pelas hidrelétricas, com 396.381 GWh (63,8%), o gás natural, com 53.515 GWh (8,6%) e a energia eólica, com 57.051 GWh (8,9%).

Ainda segundo a EPE (2024), historicamente o Brasil se destaca por apresentar uma elevada participação de fontes renováveis em sua matriz energética, especialmente quando comparado a outros países. Conforme apresentado na Figura 01, ao longo dos últimos 20 anos, a participação das fontes renováveis na matriz energética brasileira manteve-se relativamente estável, sempre acima de 40%. Entre

2011 e 2014, observa-se uma leve redução da participação das fontes renováveis, atribuída à diminuição da oferta hidráulica. A partir de 2015, verifica-se uma retomada do crescimento, impulsionada pela expansão da oferta de derivados da cana-de-açúcar, energia eólica e biodiesel. Em 2023, a participação das fontes renováveis alcançou 49,1%, favorecida também pelas condições hidrológicas positivas.

FIGURA 1: EVOLUÇÃO DA PARTICIPAÇÃO DAS FONTES RENOVÁVEIS NA OFERTA INTERNA DE ENERGIA (OIE)

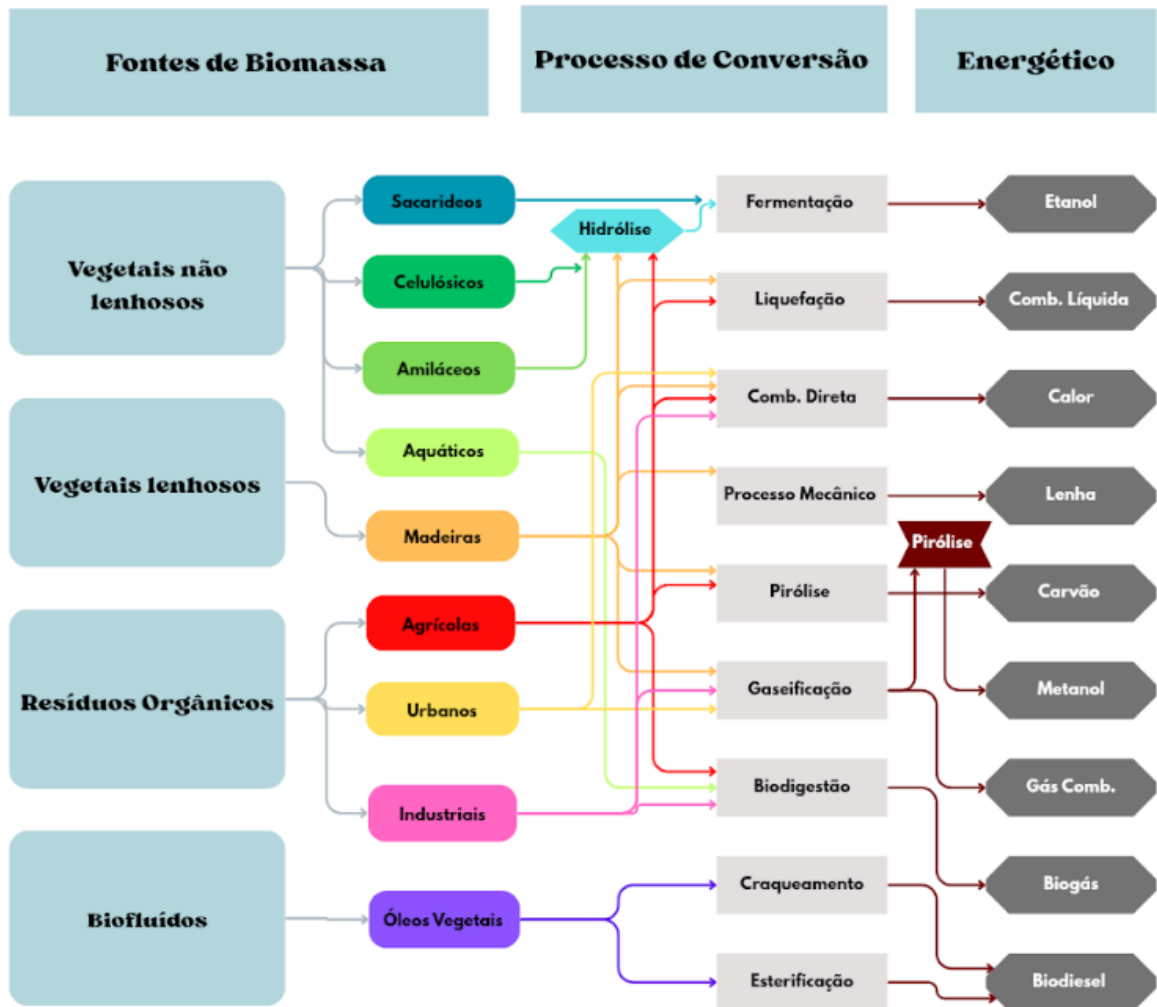


FONTE: EPE (2024).

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2018), o Brasil é reconhecidamente beneficiado por suas características de solo e clima, que favorecem o desenvolvimento de diversas fontes de biomassa de forma ampla e competitiva. Diante dessa oferta abundante, a geração de energia a partir da biomassa é considerada uma das alternativas mais promissoras para um futuro energético sustentável.

A biomassa energética apresenta rotas de conversão energética 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: Adaptado EPE (2007).

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).

2.2.1 Caracterização Imediata de Biomassa

O conhecimento das características básicas do biocombustível pode orientar qual rota de conversão energética é mais apropriada para a biomassa em estudo. As principais propriedades do material a ser empregado como fonte de energia são: teor de umidade, poder calorífico, proporções de carbono fixo e voláteis, conteúdo de cinzas, composição do carbono fixo e razão celulose/lignina (Mckendry, 2002).

A massa de água presente na biomassa refere-se ao teor de umidade do material, o qual pode expresso tanto na base úmida (b.u.) quanto na base seca (b.s.), ou seja, na apresentação de resultados torna-se necessário evidenciar em que base os resultados são apresentados (Rendeiro, 2008). Sendo assim, um alto teor de umidade dificulta a queima devido à redução do poder calorífico (Brand *et al.*, 2010).

A porcentagem de materiais voláteis desempenha 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). Ou seja, é a fase gasosa formada a partir da degradação térmica do material (Caillat; Vakkilainen, 2013). Ele é naturalmente alto para muitos tipos de biomassa, o que torna a biomassa de fácil ignição (Caillat; Vakkilainen, 2013).

Por sua vez, a porcentagem de carbono fixo é a fração do material que será queimada após a liberação dos materiais voláteis e umidade. Constituído em sua maioria por carbono, também apresentam, em menores valores, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre não liberados durante a volatilização (Sarker *et al.*, 2023).

Os resíduos resultantes da queima de combustíveis sólidos são conhecidos como cinzas. Em combustíveis lignocelulósicos, a proporção de cinzas é tipicamente baixa, em torno de (0,04 % – 0,38 %) (Crisóstomo *et al.*, 2021), enquanto para certos tipos de biomassa, pode chegar a até 20%. Diversos fatores influenciam na composição das cinzas produzidas pela queima de biomassa, sendo diretamente influenciados pela composição química da biomassa utilizada como matéria-prima, uma vez que os componentes originais da biomassa são os precursores da formação das cinzas (Vassilev *et al.*, 2013). Em geral, as cinzas são compostas por óxidos que normalmente se apresentam em estado sólido à temperatura ambiente, sendo naturalmente alcalinas, o que reduz seu ponto de fusão e pode levar à formação de incrustações e escórias (Barreto *et al.*, 2008).

2.2.1.1 Poder Calorífico

O poder calorífico superior (PCS) e o poder calorífico inferior (PCI) são duas formas de medir o quanto de energia um material libera quando é completamente queimado. Esses valores são importantes para entender qual é o real potencial energético de diferentes tipos de combustíveis. O PCS considera toda a energia liberada na combustão, incluindo o calor da água que se forma no processo e depois

condensa. Já o PCI desconsidera esse calor da água condensada, mostrando apenas a energia que pode ser aproveitada de forma direta (Sarker *et al.*, 2023; Mckendry, 2002).

Na prática, isso significa que o PCS sempre será um pouco maior que o PCI. Quando falamos da produção e uso de biocombustíveis, como os *pellets*, essa diferença pode impactar diretamente na quantidade de material necessária para gerar energia. Combustíveis com PCS mais baixos, por exemplo, exigem mais espaço para armazenamento e transporte, o que influencia no custo e na logística do processo (Maksimuk *et al.*, 2021; Gillespie *et al.*, 2013).

Vieira (2012) e Bizerra (2017) explicam que o poder calorífico pode ser classificado de duas maneiras: o Poder Calorífico Superior (PCS) e o Poder Calorífico Inferior (PCI). O PCS é obtido por meio de medições com bomba calorimétrica ou conforme os procedimentos estabelecidos pela norma NBR 8633 (1984). Esse valor representa a energia total liberada na combustão, sem considerar as perdas de calor causadas pela evaporação da água contida no combustível. Já o PCI leva em conta essas perdas, pois considera que a água gerada na combustão permanece em forma de vapor nos gases liberados. Ele é calculado a partir do PCS, ajustando-se conforme o teor de umidade (TU) e a quantidade de hidrogênio presente no material combustível.

2.2.1.2 Análise Química

De acordo com Martini (2009) os principais componentes estruturais da biomassa vegetal são a celulose, lignina e hemicelulose, apresenta também em quantidades minoritárias os extrativos e compostos inorgânicos que englobam os constituintes de baixa massa molar. A concentração da celulose é entre 40 % à 50 %, da hemicelulose de 20 à 40 %, e a lignina é de 25 %, com esta estrutura ela é um vegetal considerado como um resíduo lignocelulósico. A partir da caracterização dos teores de celulose e hemicelulose, se obtém a holocelulose, assim o teor de holocelulose se encontra entre 60 - 90% (Juppa, 2022).

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).

2.3 SORGO

De acordo com Lippel (2025), o sorgo é uma planta originária da África e está entre os cinco cereais mais cultivados no mundo, junto com o milho, trigo, arroz e cevada. Existe diferentes tipos de sorgo, cada um com finalidades específicas como o granífero, silageiro, sacarino, para corte e pastejo.

O sorgo-biomassa, chama atenção pelo seu grande potencial para gerar energia em pouco tempo de cultivo. Ele pode produzir cerca de 475 GJ por hectare em apenas 180 dias (Morales *et al.*, 2022), o que o torna uma ótima alternativa para quem busca fontes renováveis eficientes. Em campo, isso significa que a planta pode gerar mais de 100 toneladas por hectare de matéria verde e até 25 toneladas por hectare de matéria seca. Além disso, seu poder calorífico superior é de aproximadamente 4.300 kcal por quilo (Batista *et al.*, 2016; Costa *et al.*, 2018).

FIGURA 3: SORGO BIOMASSA BRS - 716



FONTE: O autor (2024)

O potencial do sorgo-biomassa vai além da produtividade. Ele apresenta várias vantagens importantes: é cultivado por sementes, tem ampla adaptação a diferentes condições de solo e clima, oferece um bom valor energético, pode ser totalmente mecanizado desde o plantio até a colheita (figura 3) e conta com um sistema de manejo já bem estabelecido (EMBRAPA, 2024). Dentre as desvantagens, esse tipo de biomassa tem baixa densidade, em torno de 80 kg m^{-3} , considerando a granulometria de colheita $< 4\text{mm}$ e umidade em torno de 10% (Dados obtidos nesta pesquisa) e alta umidade na colheita, em média 67% (Mantovani *et al.*, 2019).

Segundo Embrapa (2024), apesar do sorgo-biomassa ser uma das espécies vegetais com maior produtividade de biomassa por área, as características de baixa densidade e alta umidade no momento da colheita dificultam a queima da forma que sai do campo. Assim, sua adequação às características de queima, logística e armazenamento, próximas as da madeira, são importantes para que esta biomassa seja realmente uma boa alternativa. Para isso, é importante aliar seu potencial agrônomo com o processo de densificação que, como já dito, traz ganhos adicionais como a automação dos processos de queima.

Dentre essas desvantagens, o cavaco de madeira tem menor entrega de energia em função da maior umidade e da menor densidade, impactando diretamente no custo da energia (Tabela 1).

TABELA 1 – VARIÁVEIS ENERGÉTICAS E ECONÔMICAS DO CAVACO DE MADEIRA, SORGO-BIOMASSA DENSIFICADO E MADEIRA DENSIFICADA.

Variáveis	Cavaco de madeira	Sorgo-biomassa densificado	Madeira densificada
Umidade (%)	≅40	≅10	≅10
Densidade (Kg m ⁻³)	≅360	≅1.000	≅1.000
Cinzas (%)	≅1,2	≅3,9	≅1,2
PCS (kcal kg ⁻¹)	≅4.500	≅4.300	≅4.500
PCI (kcal kg ⁻¹)	≅4.200	≅3.900	≅4.200
PCL (kcal kg ⁻¹)	≅2.300	≅3.200	≅3.400
Densidade Energética (Gcal m ⁻³)	≅0,83	≅3,2	≅3,4
Preço (R\$ t ⁻¹)	381,77	941,20	≅1.000,00
Custo da Energia (R\$ Gcal ⁻¹)	460,00	313,70	286,00

FONTE: Adaptado Embrapa (2024).

A densidade e a umidade da biomassa têm efeitos diretos nos custos e na logística de transporte, carregando mais água e menos biomassa, além de dificuldades no armazenamento, em que a umidade favorece a biodegradação e consequente perda de carbono/energia (EMBRAPA, 2024).

Segundo Bergamim (2024), os primeiros testes em escala industrial para a produção de briquetes a partir do sorgo-biomassa foram realizados em outubro de 2024 e apresentaram resultados animadores. A empresa Calmais, em parceria com a Embrapa, conseguiu densificar o sorgo-biomassa puro utilizando uma briquetadeira industrial. O briquete formado apresentou boa consistência, sem sinais de fragmentação, o que demonstra o potencial dessa biomassa como uma nova e promissora matéria-prima para geração de energia como apresentado na Figura 4.

FIGURA 4: EQUIVALÊNCIA ENERGÉTICA, EM VOLUME (m^3), ENTRE OS COMBUSTÍVEIS CAVACO DE MADEIRA, SORGO-BIOMASSA DENSIFICADO E MADEIRA DENSIFICADA.



FONTE: Embrapa (2024).

Dessa forma, a Embrapa (2024) destaca que o sorgo-biomassa surge como uma alternativa estratégica à substituição da madeira, especialmente no contexto atual de desequilíbrio entre oferta e demanda de biomassa florestal em diversas regiões do Brasil. Sua adoção pode contribuir significativamente para reforçar a segurança energética do país, principalmente no setor industrial, que tem enfrentado dificuldades nesse cenário.

2.4 LODO DE EFLUENTE AGROINDUSTRIAL

Dentre os diversos problemas ambientais intensificados pelo crescimento populacional e pela consequente industrialização, destaca-se a destinação adequada dos milhões de toneladas de efluentes gerados diariamente pelas indústrias (Batista, 2015). O setor industrial é responsável por uma quantidade significativa de resíduos,

que podem apresentar-se tanto na forma líquida quanto sólida, abrangendo uma ampla variedade de composições.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2025), no ao longo do ano de 2024 foram abatidas aproximadamente 6,46 bilhões de cabeças de frango, representando um aumento de 2,7% (ou 172,73 milhões de cabeças) em comparação com o ano de 2023. Esse resultado estabeleceu um novo recorde na série histórica iniciada em 1997.

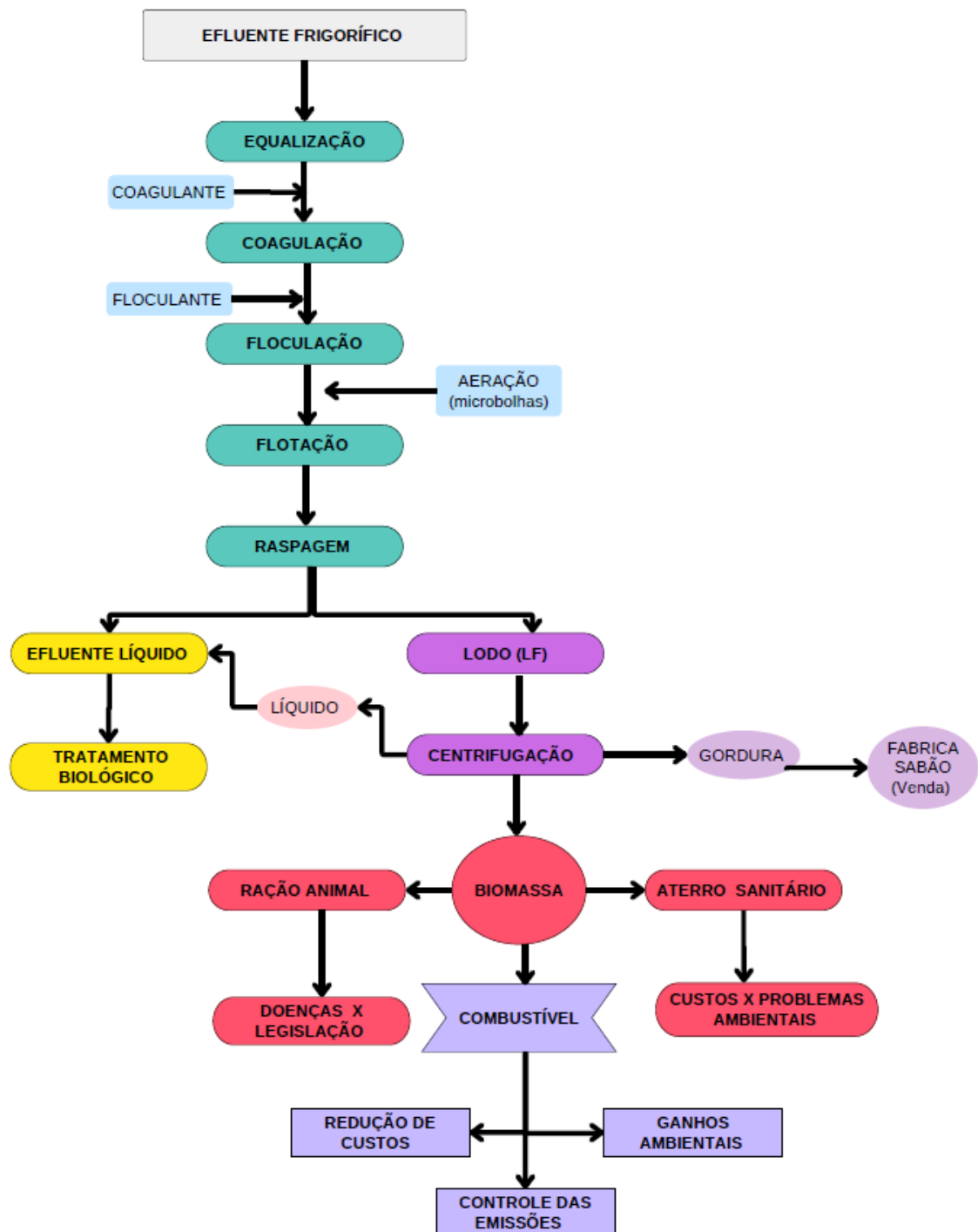
O efluente gerado nos frigoríficos de aves tem uma composição bastante variada, já que é resultado de diferentes etapas do processo de produção. Ele se origina, por exemplo, da lavagem dos caminhões, da limpeza de carcaças, vísceras e intestinos, da movimentação de subprodutos e resíduos, além da higienização de equipamentos, pisos, paredes e bancadas. Também contribuem para essa geração de resíduos atividades como a produção de vapor, o resfriamento de compressores e o processamento da carne. Além disso, há a presença de partes não comestíveis, como gordura, ossos, sangue e penas, que têm alto potencial de poluição e podem transmitir doenças se não forem corretamente tratadas (Ferreira *et al.*, 2018).

Além dos diversos resíduos gerados durante o abate, os efluentes líquidos também carregam resíduos de compostos químicos utilizados nas etapas de higienização e desinfecção, especialmente aqueles provenientes da limpeza de máquinas e equipamentos (Fagnani, 2017).

Segundo Schatzmann (2009), o processo de flotação tem como objetivo remover a maior quantidade possível de sólidos presentes no efluente, por meio da adição de coagulantes e auxiliares de coagulação. Esses produtos promovem a formação de partículas que se aderem às bolhas de ar geradas no sistema, permitindo que elas subam à superfície dos tanques de flotação. Já de acordo com Fagnani (2017), a composição do material removido é formada por todas as substâncias presentes no efluente que passaram pelos processos de coagulação e floculação dentro do flotador. O lodo resultante, que permanece flutuando na superfície, é então retirado por meio de pás raspadoras.

A figura 5 apresenta um fluxograma representando as etapas do tratamento primário, desde o início do processo até a obtenção do lodo, que pode ser utilizado como biomassa.

FIGURA 5: PROCESSO DE TRATAMENTO PRIMARIO DE EFLUENTES



FONTE: Adaptado Sena (2005).

No processo de estabilização do lodo, geralmente são adotados três métodos principais em estações de tratamento de esgoto (ETE): digestão, estabilização com cal e tratamento térmico. Na digestão, são utilizadas bactérias anaeróbicas ou aeróbicas, que atuam na decomposição da matéria orgânica, gerando gás e um resíduo estabilizado. A estabilização com cal consiste na adição de cal ao lodo,

elevando o pH para cerca de 12, o que torna o ambiente inóspito para a proliferação de microrganismos. Já o tratamento térmico envolve o aquecimento do lodo, promovendo a coagulação e ruptura dos sólidos, o que reduz a retenção de água. Após esses processos, a desidratação torna-se uma etapa essencial, pois facilita o transporte e a destinação final do lodo tratado, ao reduzir significativamente seu teor de umidade e volume (Werther *et al.*, 2000).

A disposição final adequada do lodo gerado no tratamento de efluentes é uma etapa crítica, representando até 50% dos custos operacionais totais desses sistemas. Na maioria das vezes, esse resíduo é encaminhado para descarte em aterros sanitários, o que resulta na geração de subprodutos indesejáveis, como chorume e metano (CH_4), poluentes do solo, da água e do ar, além de elevar os custos logísticos e de disposição para as empresas geradoras (Padilha *et al.*, 2019; Garcia, 2016).

Segundo Virmond (2007), tanto o lodo quanto a gordura líquida proveniente do processo de centrifugação do lodo flotado possuem potencial energético, podendo ser aproveitados como combustíveis por meio da combustão direta.

Diversas rotas tecnológicas vêm sendo estudadas para o aproveitamento energético desses resíduos, sendo a briquetagem e a peletização destacadas como alternativas viáveis, tanto do ponto de vista técnico quanto econômico. Esses processos possibilitam a produção de biocombustíveis sólidos com alta densidade energética, competitivos frente a outras fontes convencionais (Gomes, 2019).

Sena (2005) avaliou o lodo proveniente do tratamento de efluentes de uma indústria de carnes e obteve um poder calorífico superior (PCS) de 25,6 MJ/kg, valor expressivamente superior ao registrado para cavacos de madeira, que apresentaram PCS de 17 MJ/kg. Já Borges (2008) analisou lodo oriundo de uma estação de tratamento de esgoto (ETE) doméstico, encontrando um valor em torno de 19 MJ/kg.

Estudos têm explorado o uso do lodo flotado como uma alternativa de biomassa para geração de energia, especialmente por meio da queima em caldeiras. Apesar do potencial, existe uma limitação importante: a Resolução nº 042 da SEMA (2008) define regras específicas para o uso de resíduos em caldeiras. Como o lodo flotado é considerado um resíduo, ele não pode ser queimado sozinho nem misturado com outra biomassa em quantidades que ultrapassem 20% do peso ou do poder calorífico da mistura.

2.5 PELLETS

As principais desvantagens da biomassa como alternativa ao carvão, petróleo ou gás incluem sua baixa densidade energética, alto teor de umidade e falta de homogeneidade. No entanto, esses problemas podem ser mitigados ou até eliminados com o uso de *pellets* de alta qualidade, que apresentam baixo teor de umidade, alta densidade energética e tamanhos e formas uniformes. A consistência na qualidade do combustível torna os *pellets* uma opção ideal para uma ampla gama de aplicações, desde fogões e sistemas de aquecimento central até grandes usinas de energia (Thek et. al., 2012).

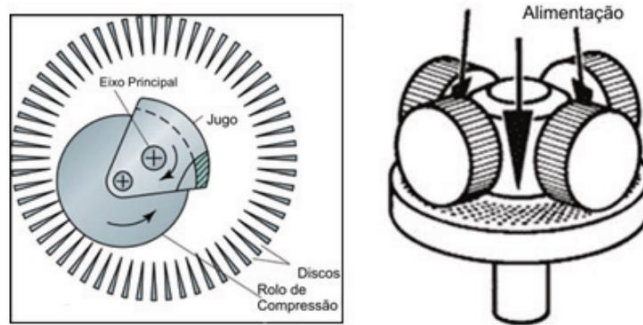
Pellet é um biocombustível sólido granulado a base de biomassa compactada e densa. Sua geometria cilíndrica apresenta em torno de 30 mm de comprimento e de 6,0 a 10,0 mm de diâmetro permitindo uma manipulação fácil, na forma automática ou manual, sendo utilizado principalmente em setores industriais e residenciais (Garcia et.al., 2013).

2.5.1 Produção de *Pellets*

Para a produção de *pellets*, os equipamentos geralmente empregados são aparelhos adaptados de processos industriais da área farmacêutica e da alimentação animal (Dias et al., 2012). Como a biomassa é muito diversificada, muitas adaptações são elaboradas.

A mais comum para *pellets* é uma prensa pelletizadora constituída por um ou mais rolos (Figura 6), que giram contra uma matriz com vários furos de diâmetro pequeno. Ao passar pelo rolo, a matéria prima que estava entre o rolo e a matriz acaba saindo da matriz por extrusão (Dias et al., 2012).

FIGURA 6: MODELO DE PELETIZADORA DE MATRIZ CILÍNDRICA (ESQUERDA) E MATRIZ PLANA (DIREITA)

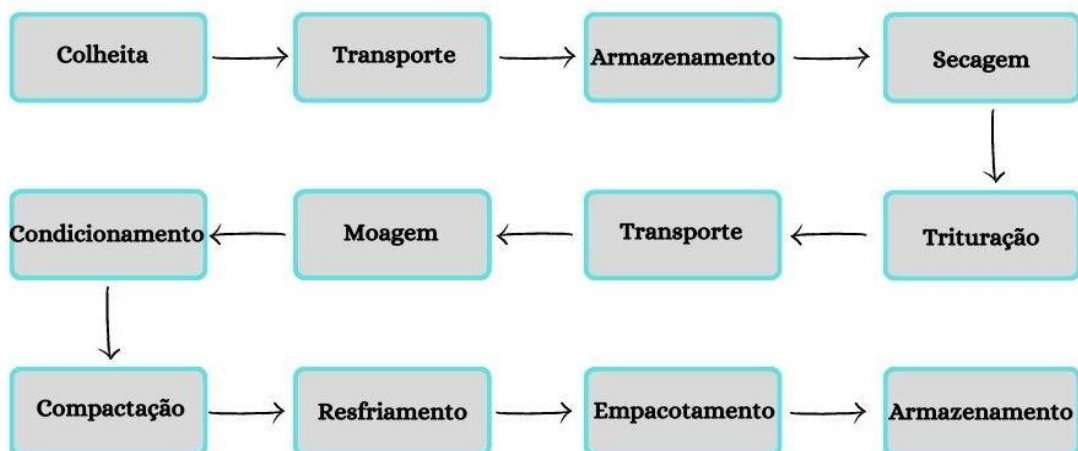


FONTE: Tumurulu *et. al.*, (2011).

A linha de produção de biomassa é composta por vários componentes interligados, podendo ser dividida em diferentes seções. Os equipamentos variam conforme o tipo de matéria-prima processada, mas geralmente incluem um silo de armazenamento da matéria-prima, um triturador, secador, gerador de ar quente, peletizadora, resfriador, máquina de embalagem e um silo de carga (Santos *et al.*, 2013).

A biomassa, após ser retirada do silo, passa por um processo de limpeza e secagem, seguida de trituração. Em seguida, é armazenada e transportada até a prensa granuladora, onde se formam os *pellets*. Esses *pellets*, então, seguem para o resfriador, onde são resfriados, secos, limpos e embalados (Santos *et al.*, 2013). As etapas do processo de peletização podem ser visualizadas na figura 7.

FIGURA 7: ETAPAS DA PRODUÇÃO DE *PELLETS*



FONTE: Adaptado de DIAS *et al.*, 2012.

2.5.2 Mercado de *Pellets* no Brasil

O mercado de *pellets* de biomassa vegetal cresceu nos últimos anos em função da grande demanda por fontes energéticas alternativas aos derivados do petróleo e por países que precisam diminuir suas emissões de gases do efeito estufa para atender aos acordos firmados no Protocolo de Kyoto (Brasil, 2007).

Dados de 2020 da EPE constam que as fontes renováveis somam 15% da matriz energética mundial, na qual a biomassa representa 9,8% desse valor. Já no Brasil as fontes renováveis retratam 45% da matriz energética, sendo 8,2% a partir da biomassa, encaminhando um melhor manejo da terra, reciclagem de nutrientes, controle de resíduos além da criação de empregos (EPE, 2021).

2.5.3 Normativa

A qualidade da biomassa densificada está diretamente relacionada às suas propriedades físicas, químicas e mecânicas. Para garantir a uniformidade desses produtos, a padronização por meio de normas técnicas é essencial.

No cenário internacional, especialmente na Europa, diversos países consumidores desenvolveram suas próprias normativas para assegurar a qualidade dos *pellets* e outros biocombustíveis sólidos. De acordo com Rangel *et al.* (2018), o Comitê Europeu de Normalização, conhecido como European Committee for Standardisation (CEN), instituiu o Comitê Técnico TC 335, responsável pela elaboração de normas referentes à dureza, granulometria, teor de cinzas, entre outros parâmetros técnicos essenciais para a padronização da biomassa.

Na Alemanha, conforme ressaltado por Rangel *et al.* (2018), o Deutsches Institut für Normung (DIN) propõe uma série de normas para combustíveis sólidos. Dentre essas, destacam-se a DIN 51731, voltada à madeira compactada sem tratamento; a DIN EN 15270, que regula queimadores de *pellets* em pequenos aquecedores; e a DIN 66165, que trata da análise de tamanho de partículas por peneiramento.

A Áustria também apresenta regulamentações específicas, de acordo com Rangel *et al.* (2018), por meio do Österreichisches Normungsinstitut (ÖNORM), como a ÖNORM M 7135 (para cascas), ÖNORM M 7136 (logística e transporte) e ÖNORM

M 7137 (armazenamento para consumidores finais), que garantem a qualidade em todo o ciclo da biomassa densificada.

Segundo Rangel *et al.* (2018), a Suécia adota a norma SS 187120 da Swedish Standards Institute (SS) para regulamentar a produção e o uso de *pellets*, enquanto a Itália segue a norma CTI-R04/05, desenvolvida pelo Comitato Termotecnico Italiano (CTI), com foco nos *pellets* derivados de biomassa. Já a França conta com o controle de qualidade promovido pela International Association of Bioenergy Professionals (ITEBE), que classifica os *pellets* de acordo com seu uso final.

Por fim, na América do Norte, Rangel *et al.* (2018) destacam que o *Pellet Fuel Institute* recomenda o uso das normas estabelecidas pela American Society for Testing and Materials (ASTM). Dentre elas, estão a ASTM E873 (densidade aparente), ASTM E871 (umidade em combustíveis de madeira particulada), ASTM D1102 (teor de cinzas em madeira) e ASTM E711 (poder calorífico superior por meio de bomba calorimétrica), garantindo a uniformidade e desempenho dos combustíveis sólidos no mercado norte-americano.

No Brasil, em contrapartida, não há normatização específica para todo tipo de biocombustível, mesmo com a produção do país crescendo. Utiliza-se adaptações das normas da Associação Brasileira de Normas e Técnicas (ABNT) de carvão vegetal e a norma ABNT NBR 17013:2022. Os principais parâmetros de qualidade e de classificação de *pellets* de pinus estão presentes no Quadro 1.

QUADRO 1 – PARÂMETROS DE QUALIDADE PARA A CLASSIFICAÇÃO DE *PELLETS* DE PINUS, SEGUNDO A ABNT NBR 17013:2022

PARÂMETROS	UNIDADE	A1	A2	B
Comprimento	Mm	3,15 a 40	3,15 a 40	3,15 a 40
Diâmetro	Mm	6 ou 8	6 ou 8	6 ou 8
Umidade	%	≤ 8	≤ 9	≤ 10
Cinzas	%	≤ 0,7	≤ 1,2	≤ 10

FONTE: Adaptado de ABNT (2022).

Segundo a ABNT (2022), os *pellets* de pinus são classificados em três categorias principais de recomendação de uso: A1, A2 e B. A classe A1 é destinada ao uso residencial e em estabelecimentos comerciais que operam com equipamentos de pequeno e médio porte, priorizando alta qualidade e baixo teor de impurezas. A classe A2 é recomendada para aplicações em estabelecimentos comerciais e indústrias que utilizam equipamentos de médio a grande porte, admitindo uma margem maior de variações nas características do combustível. Já a classe B é

voltada exclusivamente para uso industrial, sendo indicada para equipamentos de grande porte, nos quais é possível lidar com um combustível de menor qualidade e maior teor de cinzas e impurezas.

A norma contempla uma série de ensaios essenciais para assegurar a qualidade e a padronização do produto, incluindo:

- a) Determinação do teor de finos;
- b) Avaliação da durabilidade mecânica dos *pellets*;
- c) Medição do diâmetro e do comprimento;
- d) Cálculo da densidade a granel;
- e) Análise da umidade;
- f) Determinação do teor de cinzas;
- g) Avaliação dos poderes caloríficos superior, inferior e líquido (PCS, PCI, PCL).

Esses procedimentos são fundamentais para garantir que os *pellets* estejam em conformidade com os padrões exigidos de desempenho e segurança, de acordo com sua finalidade de uso.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento deste trabalho envolveu a coleta e preparo das matérias-primas utilizadas: lodo flotado e sorgo BRS-716 e a peletização dos tratamentos. As misturas foram organizadas em diferentes tratamentos (TSa, TSL20a, TSb, TSL20b), variando a quantidade de moagens do sorgo e a inclusão do lodo conforme apresentado na tabela 2. As matérias-primas e os pellets foram submetidos a análises físico-químicas e energéticas.

TABELA 2 -COMPOSIÇÃO DOS TRATAMENTOS PRODUZIDOS

Tratamento	Sorgo BRS-716 (%)	Lodo Flotado (%)	Passagem pela Forrageira
TSa	100	0	1X
TSL20a	80	20	1X
TSb	100	0	2X
TSL20b	80	20	2X

FONTE: O autor (2025).

3.1 COLETA E PREPARO DAS AMOSTRAS

A biomassa proveniente de sorgo BRS-716 com 6 meses de idade composta por folhas e caules (figura 8), foi obtida em uma propriedade particular localizada no município de Palotina - Paraná. Uma amostra significativa de cerca de 10 kg de sorgo foi colhida manualmente com corte a 5cm do solo e levado à UFPR embalado em saco plástico para determinação da umidade no momento da coleta. Também foi encaminhada para a UFPR uma amostra representativa de 200 kg de sorgo obtida por colheita mecanizada (figura 10) sendo o material espalhado no piso para secagem ao sol. Após uma parte foi moída em forrageira com peneira de abertura de 5mm, após algumas análises, achou-se necessário moer parte da amostra duas vezes na mesma forrageira com a mesma peneira.

FIGURA 8: SORGO BRS-716 COM 6 MESES DE IDADE



FONTE: O autor (2024)

FIGURA 9: COLETA DO SORGO



FONTE: O Autor (2024).

FIGURA 10: PREPARAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA (SORGO)



FONTE: O autor (2024).

O lodo foi coletado na Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) de uma agroindústria localizada na região oeste do Paraná (figura 11). Esse resíduo é originado das etapas de abate de aves e peixes, bem como da lavagem das áreas

internas complexo industrial, tendo sido utilizado cloreto férrico como coagulante no processo de tratamento. O lodo do efluente foi colocado em baldes plásticos de 20 litros com tampa e levado até o Laboratório de Produção de Biocombustíveis da UFPR – Setor Palotina. Lá, o material passou por um processo de secagem em estufa a 105 °C, durante cerca de 24 horas.

FIGURA 11 – COLETA DE LODO



FONTE: O autor (2024).

3.1.1 Determinação do teor de umidade no momento da coleta

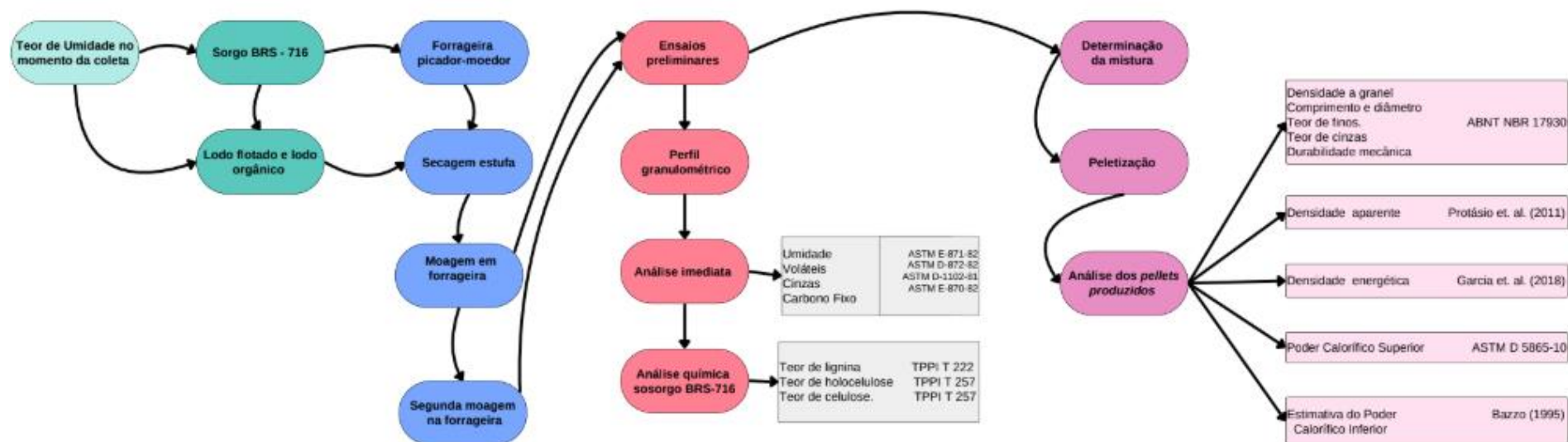
Foram retiradas ao acaso aproximadamente 100 g de cada material no lugar onde foi coletado, em pontos diferentes, posto em balde e misturado, de forma que se obteve uma amostra homogênea de cada parte coletada, o processo foi feito com a biomassa (sorgo) e com o lodo. Seguindo a ABNT NBR 17030: 2022 realizou-se o quarteramento de cada amostra, garantido que a porção do ensaio represente a amostra original.

3.1.2 Perfil granulométrico

A granulometria do material, após passar na forrageira e homogeneizada como um todo, foi classificada em peneiras com abertura de 20 mesh (0,85 mm), 35

mesh (0,50 mm), 60 mesh (0,25 mm), 80 mesh (0,18 mm), 100 mesh (0,15 mm) e o que passou de 100 mesh ($<0,15\text{mm}$).

Pesou-se aproximadamente 100g de cada amostra e colocado na parte superior do conjunto de peneiras, foi agitado por aproximadamente 20 minutos em um agitador de peneiras eletromagnético da marca BERTEL, posteriormente é retirado o conjunto e pesado o material retido em cada peneira, definindo o perfil granulométrico das amostras, sendo realizado em triplicata as amostras. Em seguida ser submetida as análises presentes no fluxograma da figura 12.

FIGURA 12 – FLUXOGRAMA DAS METODOLOGIAS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS *PELLETS*

FONTE: O Autor (2025).

3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA

3.2.1 Determinação do Teor de Lignina

Na análise química, foram determinados os teores de lignina seguindo métodos normativos TAPPI T 222 om-98. Todas as análises foram realizadas em triplicata no Laboratório de Química Orgânica da Universidade Federal do Paraná – Setor Palotina.

O preparo das amostras para as análises consistiu em pesar 1 g das amostras e embala-las em papel filtro, todas realizadas em triplicata. Os envelopes foram submetidos à extração em aparelho de Soxhlet, primeiramente com uma solução de etanol-tolueno (1:2) por 6 horas, seguida de uma nova extração com etanol pelo mesmo período. Após a extração, os envelopes foram lavados três vezes, por uma hora cada, com água fervente, e, em seguida, levados à estufa para secagem.

Em erlenmeyers de 250mL foram colocadas as amostras presentes dentro dos envelopes após as extrações e adicionou-se 15mL da solução de H₂SO₄ 72%, e colocados em banho de gelo (18 a 20°C) durante 2 horas. Em seguida, as amostras foram transferidas para um Erlenmeyer de 1000 mL com 560 mL de água e postas em banho-maria em ebulição, e mantidas por 4 horas. Passado o período de espera as três amostras foram filtradas separadamente em papel filtro pesado, utilizando 100 mL de água destilada para atingir pH neutro, secas em estufa a 105 °C por 24 horas colocadas em dessecador até seu resfriamento e pesadas. A porcentagem do teor lignina foi calculada utilizando a equação 1.

$$L = \frac{PR}{1,000} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

L = Lignina (%);

PR = Peso do Resíduo (g);

Peso do Resíduo = Peso Total Final – Tara do Cadinho.

3.2.2 Análise imediata

Foi realizada a análise química imediata das matérias-primas (lodo e sorgo), incluindo a determinação da umidade (W), conforme a norma ASTM E-871-82; dos materiais voláteis (MV), de acordo com a ASTM D-872-82; do carbono fixo (CF), seguindo a ASTM E-870-82; e do teor de cinzas (CZ), conforme a ASTM D-1102-84, como ilustrado na Figura 12. As análises foram realizadas com amostras antes da peletização e após, sendo cada *pellet* moído e peneirado antes, as determinações foram realizadas no Laboratório de Química Orgânica da UFPR – Setor Palotina, sendo feitas em triplicata.

3.2.2.1 Determinação do teor de umidade (W)

Para quantificar o teor de água presente na amostra, pesou-se aproximadamente 1g da amostra em cada cadinho calcinado de porcelana com tampa, após as pesagens, os cadinhos destampados permaneceram na estufa durante 4 horas a uma temperatura de 105°C. Após o resfriamento no dessecador, pesou-se o cadinho e realizou-se o cálculo da umidade (W), por meio da equação 2.

$$W = \frac{m_0 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

W = Teor de Umidade (% b. u.);

m₀ = Massa da amostra Úmida (g);

m₁ = Massa da amostra Seca (g).

3.2.2.2 Determinação de materiais voláteis (MV)

Os cadinhos tampados utilizados na análise do teor de umidade foram submetidos a mufla pré-aquecida a 950°C, um por vez, durante 6 minutos. Após o resfriamento em dessecador, pesou-se a amostra e realizou-se o cálculo (MV), como apresentado na equação 3.

$$MV = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

MV = Teor de Voláteis (% b.s.);

m₁ = Massa da Amostra Seca (g);

m_2 = Massa da Amostra após Voláteis (g).

Esse processo representa a porcentagem de produtos gasosos, que são os compostos químicos com baixo ponto de ebulição presentes na amostra.

3.2.2.3 Determinação do Teor de Cinzas (CZ)

Os cadinhos destampados e suas respectivas tampas que passaram pela determinação dos materiais voláteis são destinados para a mufla fria por um período de 3 horas após chegar a 750°C. Depois do resfriamento em dessecador, realiza-se anotação da massa dessa amostra e o cálculo (CZ), que corresponde a porcentagem da parcela inorgânica do material estudado, como apresentado na equação 4.

$$CZ = \frac{m_3}{m_1} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

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

m_3 = Massa após Carbonização (g);

m_1 = Massa Seca (g).

3.2.2.4 Determinação de Carbono Fixo (CF)

O carbono fixo é calculado pela equação 5.

$$CF = \frac{m_2 - m_3}{m_1} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

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

m_1 = Massa da amostra seca (g);

m_2 = Massa de carbono e cinzas (g);

m_3 = Massa de cinzas (g).

3.3 PROCESSO DE PELETIZAÇÃO

Foram realizados quatro tratamentos de *pellets* a partir de misturas com diferentes proporções de lodo flotado e sorgo biomassa. A principal diferença entre as amostras TSa e TSL20a em relação as TSb e TSL20b está na quantidade de vezes

em que o sorgo foi moído. O sorgo passou duas vezes pela forrageira nas misturas com sufixo b, conforme detalhado na Tabela 3. Houve a segunda passagem pela forrageira devido a falta de aglutinação ao peletizar os tratamentos com sufixo a.

TABELA 3 - COMPOSIÇÃO DOS TRATAMENTOS PRODUZIDOS

Misturas	Sorgo BRS-716 (%)	Lodo Flotado (%)	Passagem pela Forrageira
TSa	100	0	Moído 1 vez
TSL20a	80	20	Moído 1 vez
TSb	100	0	Moído 2 vezes
TSL20b	80	20	Moído 2 vezes

FONTE: O autor (2025).

A preparação das misturas dos tratamentos foi realizada no Laboratório de Química Orgânica da Universidade Federal do Paraná – Setor Palotina. Cada componente foi devidamente pesado e combinado em recipientes apropriados. Ou seja, foram calculado qual seria a massa necessária de cada material (sorgo e lodo) para sua devida mistura, pesados, misturados em uma lona de forma homogênea. Em seguida, as misturas foram acondicionadas em sacos plásticos, devidamente identificados e armazenados até o momento do envio para o processo de peletização.

As misturas produzidas foram levadas até a empresa HMBio Energias Renováveis no distrito de Concórdia do Oeste, município de Toledo-PR, onde foi realizado o processo de peletização. A operação foi feita utilizando uma prensa peletizadora modelo JNMX 630 (figura 13), equipada com matriz de orifícios de 6 mm de diâmetro.

FIGURA 13: MATRIZ PELETIZADORA DA HMBIO



Fonte: O autor (2025).

3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS *PELLETS*

Os pellets produzidos foram caracterizados conforme as normas apresentadas na Tabela 4.

TABELA 4 - ANÁLISES E REFERENCIAS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS *PELLETS* PRODUZIDOS

Análise	Norma
Umidade	ASTM E-871-82
Teor de Materiais Voláteis	ASTM D-872-82
Teor de Cinzas	ASTM D-1102-84
Teor de Carbono Fixo	ASTM E-870-82
Densidade a granel	
Teor de Fino	
Comprimento e Diâmetro	ABNT NBR 17030
Teor de Cinzas	
Durabilidade Mecânica	
Densidade aparente	Protásio <i>et al.</i> (2011b)
Densidade energética	Garcia <i>et al.</i> (2018)
Poder Calorífico Superior	ASTM D-5865 – 10

FONTE: Juppa (2025).

3.4.1 Teor de umidade

Pesou-se um béquer de 500 mL em uma balança analítica e anotada a massa, neste béquer pesou-se aproximadamente 300 g *dos pellets*. Sendo essa uma determinação de umidade dos *pellets*, com o intuito de analisar após o processo de peletização. O método foi feito em duplicata.

Para calcular o teor de umidade, expresso em porcentagem, usou-se a equação 6:

$$U (\%) = \frac{M_i - M_s}{M_s} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

U = Teor de Umidade (%);

M_i = Massa Inicial (g);

M_s = Massa seca (g).

3.4.2 Determinação do Poder Calorífico Superior

A determinação do poder calorífico superior (PCS) das amostras foi realizada com o uso de uma bomba calorimétrica automática da marca IKA, modelo C5000. O procedimento seguiu rigorosamente a norma ASTM D5865 – 10 (ASTM, 2010), que estabelece os critérios para a medição do poder calorífico de combustíveis sólidos,

garantindo resultados confiáveis e comparáveis com dados da literatura, sendo possível avaliar o potencial energético dos materiais utilizados no estudo.

Para determinar o Poder Calorífico Superior (PCS) dos pellets com 20% de lodo TSL20, foi utilizada a equação (7), que considera os valores de PCS dos pellets 100% sorgo TS, bem como a proporção de serragem e lodo flotado na mistura.

$$PCS = PCS_{\text{lodo flotado}} \times \% \text{ lodo flotado} + PCS_{\text{sorgo}} \times (1 - \% \text{ lodo flotado}) \quad (7)$$

3.4.3 Teor de finos

FIGURA 14: ANÁLISE TEOR DE FINOS



Fonte: O autor (2025).

Aproximadamente 6 kg de *pellets* foram pesados em um balde e, em etapas, transferidos manualmente para uma peneira com malha $\leq 3,35$ mm, posicionada sobre uma bandeja coletora. O processo de peneiramento foi realizado manualmente, com o objetivo de separar as partículas finas dos *pellets* (figura 15). Esse procedimento foi repetido até que todo o material fosse peneirado. Em seguida, tanto o material retido na peneira (*pellets*) quanto o material coletado na bandeja (finos) foram novamente pesados para registro.

A porcentagem do teor de finos foi calculada pela equação 8.

$$Far = \frac{\sum MA}{\sum MP + \sum MA} \times 100 \quad (8)$$

Far = Porcentagem dos finos (%);

MA = Massa total de todas as partículas que passaram pela peneira (g);

MP = Massa total das frações de material que ficaram na peneira, após o peneiramento (g).

3.4.4 Durabilidade Mecânica

FIGURA 15: PROCEDIMENTO DURABILIDADE MECÂNICA



Fonte: O autor (2025).

Foi pesado aproximadamente 1 kg de *pellets* em uma bandeja, o qual foi dividido em duas amostras de 500 g cada. Inicialmente, cada porção foi peneirada com o objetivo de remover as partículas finas. Em seguida, as amostras foram submetidas ao ensaio de resistência mecânica em um friabilômetro da marca Ethink, operando a 25 rotações por minuto durante 20 minutos, conforme ilustrado na figura 18. Após o teste, os *pellets* foram novamente peneirados utilizando uma peneira com abertura de malha $\leq 3,35$ mm, e o material retido foi pesado. A durabilidade mecânica foi então calculada de acordo com a equação 9.

$$DM = \frac{MA}{ME} \times 100 \quad (9)$$

Onde:

DM = durabilidade mecânica (%);

MA = massa da porção peneirada após a realização do ensaio (g);

ME = massa total da amostra pesada inicialmente (g).

3.4.5 Comprimento e Diâmetro médio

De acordo com a norma NBR 17030:2022, o processo começa com a peneiração da amostra que será analisada, para remover as partículas mais finas. O material que permanece na peneira é pesado, e todos os pellets têm seus comprimentos medidos.

Depois disso, com o auxílio de um paquímetro, são escolhidos aleatoriamente 20 pellets, e seus diâmetros são anotados. Os pellets também são separados por comprimento, e aqueles que estiverem entre 40,01 mm e 45 mm devem ser pesados separadamente. O diâmetro médio é calculado somando-se os diâmetros dos 20 pellets medidos (mesmo que alguns tenham mais de 40 mm de comprimento) e dividindo esse valor por 20 (equação 10).

$$D_m = \frac{\sum D_t}{20} \quad (10)$$

Onde:

D_m = Diâmetro médio (mm);

D_t = Diâmetro dos 20 *pellets* analisados.

Já o comprimento médio é obtido somando-se o comprimento de todos os pellets medidos e dividindo esse total pela quantidade de pellets analisados (equação 11).

$$L_m = \frac{\sum L_t}{n_t} \quad (11)$$

No qual:

L_m = Comprimento médio (mm);

L_t = Comprimento dos *pellets* analisados;

n_t = Número total de *pellets* analisados.

3.4.6 Densidade a Granel

Completou-se com *pellets* um cilindro metálico de 5 litros de volume, onde após o mesmo ser largado verticalmente três vezes de uma altura entre 200-300 mm. É possível estimar a partir da equação 12.

$$D = \frac{M}{V} \quad (12)$$

Onde:

D = Densidade (kg m^{-3});

M = Massa (kg);

V = Volume do Cilindro (m^3).

3.4.7 Densidade Aparente Energética

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 13), é possível obter o volume das amostras, e para os resultados das densidades aparente, foi realizado através da equação (14).

$$v = \pi \cdot r^2 \cdot h \quad (13)$$

$$D1 = \frac{m}{v} \quad (14)$$

Onde:

r= raio (m);

h= altura(m);

v= volume(m³);

D1= densidade a aparente (kg.m⁻³);

m= massa (kg).

A densidade energética foi calculada multiplicando os valores do poder calorífico superior pelos valores de densidade aparente, utilizando a equação 15.

$$D2 = PCS \times D1 \quad (15)$$

Onde:

D2= densidade energética (MJ.m⁻³);

PCS= poder calorífico (MJ.Kg⁻¹).

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

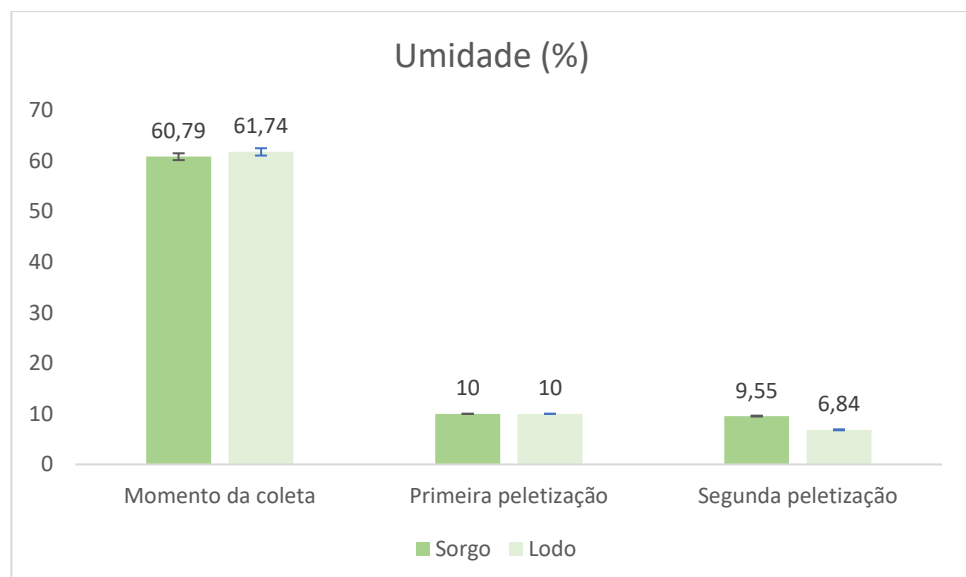
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA

4.1.1 Umidade

O controle da umidade é uma etapa fundamental para garantir a eficiência do processo de peletização, segundo Carvalho *et al.*, (2013), o teor de umidade deve ser de 8 – 15 % para que os pellets apresentem uma boa aglutinação das partículas. No Gráfico 02 são apresentados os resultados de umidade para o lodo e o sorgo no momento da coleta e nas duas peletizações realizadas. Segundo Obernberger e Thek (2010) a umidade da matéria-prima para produção de pellets deve estar entre 8,0 a 12,0%, pois quando a umidade se encontra abaixo desse intervalo dificulta a transferência de calor e consequentemente a plastificação da lignina e quando está acima do intervalo o diâmetro e o comprimento não são estáveis.

No Gráfico 01 é possível observar o verde escuro representando o sorgo e o cinza claro representando o lodo, mostrando o momento da coleta, antes da primeira peletização e antes da segunda peletização respectivamente.

GRÁFICO 1: UMIDADE NO MOMENTO DA COLETA



Fonte: O autor (2025).

O sorgo e o lodo apresentavam teores iniciais de umidade elevados. Nos tratamentos TSa e TSL20a, a umidade foi ajustada previamente para cerca de 10%, garantindo maior homogeneidade entre as amostras e favorecendo a formação dos *pellets*.

Por outro lado, nos tratamentos TSb e TSL20b, em que o sorgo foi submetido a uma segunda moagem, os materiais não passaram por ajuste de umidade. Como consequência, o sorgo e o lodo utilizados apresentaram teores diferentes de umidade, o que pode ter influenciado a compactação e a qualidade dos *pellets* obtidos, especialmente no que se refere ao teor de finos e à durabilidade mecânica.

O teor de umidade da matéria-prima é fundamental durante a peletização de materiais lignocelulósicos, pois influencia a ligação das partículas afetando a durabilidade mecânica, a qualidade do produto final e a eficiência do processo (Dias *et al.*, 2012).

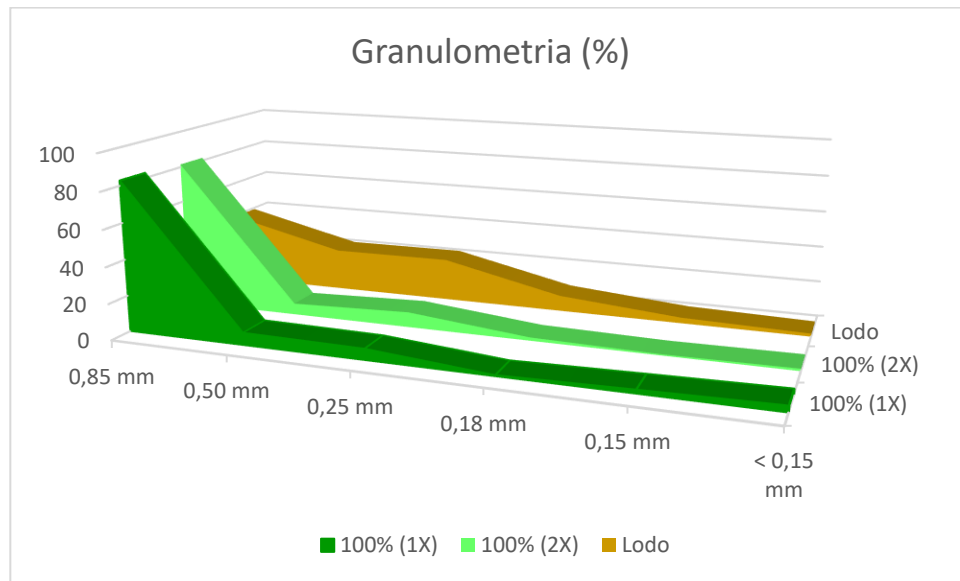
Assim, uma umidade ideal presente na biomassa vai facilitar a compactação na formação dos pellets promovendo a ligação entre as partículas do material, e a plastificação da lignina (Nones, 2014; Souza *et al.*, 2012; Tumurulu *et al.*, 2011).

4.1.2 Caracterização Granulométrica

No Gráfico 2 é apresentada a distribuição granulométrica da biomassa de sorgo e lodo utilizada nas misturas realizadas no trabalho.

A maior parte do Sorgo para 1X e 2X ficou retida na peneira de 0,85mm, não havendo grande influência na quantidade de moagem na distribuição, enquanto para o lodo flotado, houve uma distribuição maior nas peneiras de 0,85, 0,50 e 0,25mm.

GRÁFICO 2: GRANULOMETRIA



Fonte: O autor (2025).

Ainda segundo Dias *et al.*, (2012), quanto menor for o tamanho de partícula, menor será a porosidade do produto final e, portanto, maior será a sua densidade.

Stelte *et al.* (2012) sugere que o tamanho das partículas de biomassas para serem peletizadas devem ser de 5mm. De acordo com Kaliyan e Morey (2009), um alto teor de partículas finas pode levar a bloqueios na matriz peletizadora, uma vez que podem secar rapidamente, reduzindo o atrito na matriz e por consequência reduz a qualidade dos *pellets* final.

No geral, há consenso de que quanto mais fina a partícula pra peletização, mais durável torna-se o *pellet*. Os *pellets* produzidos a partir de partículas finas apresentam maior resistência à compressão e abrasão (Larsson;Rudolfsson, 2012; Whittaker; Shield, 2017; Kaliyan;Morey, 2009).

4.1.3 Caracterização físico-química

Na compactação de *pellets* de biomassa lignocelulósica a lignina atua como um agente de ligação natural no material. Em temperaturas elevadas de compactação, a lignina amolece, tornando-se plástica, e ajuda no processo de ligação entre as partículas (Sena, 2021).

TABELA 5: CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA (LIGNINA)

Autor	Amostra	Lignina (%)
O autor (2025)	Sorgo	21,14
Gomes (2017)	Sorgo	29,05
Juppa (2025)	BRS Capiacu	16,61
Andriola (2023)	BRS Capiacu	10,47
Alves (2021)	BRS Capiacu	7,68
Pradhan <i>et al.</i> (2025)	Cavaco de madeira dura	10,3
Vivian <i>et al.</i> (2020)	<i>Pinus Glabra</i>	29,93

FONTE: O Autor (2025).

Os teores de umidade, voláteis, carbono fixo e cinzas obtidos na caracterização físico-química sorgo e do lodo são apresentados na (tabela 6), bem como referências de outros autores. As análises de caule, folha e planta inteira do sorgo foi feita com o intuito de analisar se as partes das plantas separadamente interferiam nos resultados, entretanto, não houve interferência considerável.

TABELA 6: ANÁLISE IMEDIATA

Autor	Amostra	Voláteis (%)	Carbono Fixo (%)	Cinzas (%)
Simeone <i>et al.</i> (2018)	Sorgo (inteiro)	79,6	---	4
Gomes <i>et al.</i> (2017)	Sorgo (inteiro)	83	14,45	3
ABIP (2024)	Sorgo (inteiro)	---	22,5	1,65
O autor (2025)	Caule Sorgo	82,35	14,32	3,33
O autor (2025)	Folhas do Sorgo	80,17	15,33	4,5
O autor (2025)	Sorgo (inteiro)	81,5	14,5	4
O autor (2025)	Lodo	85,94	5,73	8,32

FONTE: O autor (2025).

Segundo Lima (2024), ao fazer um comparativo com diferentes proporções de lodo a serragem de pinus, os *pellets* que contêm mais lodo flotado tendem a formar mais incrustações durante o uso. Já os pellets feitos com 95% de serragem de pinus se mostraram com menos acúmulo de resíduos. Essa diferença pode estar ligada aos materiais presentes no lodo, que facilitam esse tipo de acúmulo e podem atrapalhar o funcionamento dos equipamentos ao longo do tempo.

Ao analisar a biomassa in natura composta por caule, folhas e flores, observa-se uma porcentagem considerável de cinzas. No entanto, as folhas são as principais responsáveis por esse aumento no teor de cinzas. Por outro lado, o caule apresenta um teor de materiais voláteis mais elevado em comparação com a planta inteira e com as folhas isoladamente. Segundo Gomes (2010), a madeira de Pinus

apresentou 84,3% de compostos voláteis. O autor destaca que esse é um fator importante, pois um alto teor de voláteis pode favorecer o ponto de ignição dos combustíveis, facilitando sua combustão.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS PELLETS

Na figura 16 são apresentados os pellets TSa, TSb e na figura 17 os pellets TSL20a e TSL20b. É possível perceber que, à medida que se aumenta a proporção de lodo flotado na mistura com o sorgo, os pellets passam a perder a aglutinação entre as partículas, o que deixa os pellets mais frágeis e quebradiços.

Stachowicz e Stolarski (2024) utilizaram um moinho de martelos com peneira de 12 mm para obter frações mais finas de três tipos de biomassas: serragem de pinheiro silvestre, lascas de salgueiro e lascas de acácia-negra. Posteriormente, essas biomassas foram moídas novamente, também em moinho de martelos, mas com peneira de 6 mm, para então serem utilizadas no processo de peletização.

Lima (2024) também observou que, com o aumento do lodo flotado na composição, há uma maior geração de cinzas e de material fino durante a queima. Esses fatores podem comprometer a eficiência do processo e exigir cuidados extras no controle da queima e na manutenção dos equipamentos.

FIGURA 16: TRATAMENTOS TSa E TSb RESPECTIVAMENTE



Fonte: O autor (2025).

FIGURA 17: TRATAMENTO TSL20a E TSL20b RESPECTIVAMENTE



Fonte: O autor (2025).

Para a produção de *pellets*, características como a umidade e a granulometria da matéria-prima devem ser controladas. Uma mistura de partículas de vários tamanhos pode melhorar a qualidade dos pellets, sendo uma granulometria entre 6 e 8 mm considerada qualificada para a matéria-prima ter uma compactação eficiente. (Silva et al., 2018; Dias et al., 2012). Ainda segundo Dias *et al.*, (2012), quanto menor for o tamanho de partícula, menor será a porosidade do produto final e, portanto, maior será a sua densidade.

Na Tabela 7 são apresentados os teores de umidade dos pellets produzidos TSa, TSL20a, TSb e TSL20b.

TABELA 7 – UMIDADE *PELLETS*

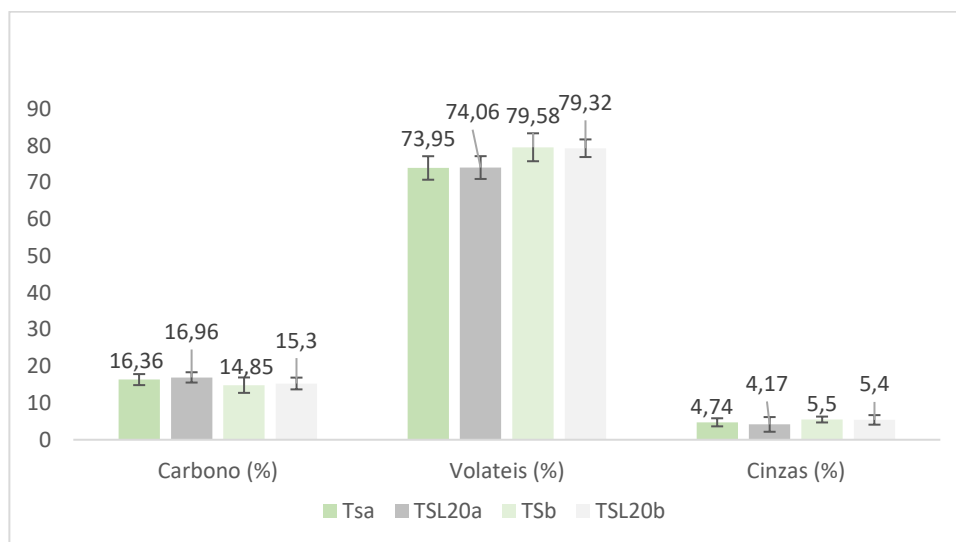
Autor	Tratamento	Umidade (%)	Classificação NBR 17013-1 (2022)
O autor (2025)	TSa	8,20	A2
O autor (2025)	TSL20a	8,30	A2
O autor (2025)	TSb	6,34	A1
O autor (2025)	TSL20b	5,12	A1
Assis (2022)	Cama de aviário	9,59	A2
Assis (2022)	Lodo (20%) + Cama de aviário	10,24	B
Juppa (2024)	Lodo (100%)	0,79	A1
Juppa (2025)	Capiaçu + Lodo (20%)	5,68	A1
Lima (2024)	Serragem de Pinus	8,53	A2
Lima (2024)	Serragem de Pinus + Lodo (20%)	7,17	A1

FONTE: O autor (2025).

Segundo Huand *et al.*, (2017), no processo de peletização a umidade é negativamente correlacionada ao atrito da parede, pois funciona como um lubrificante que reduz o atrito na matriz politizadora.

Para os tratamentos TSa e TSb, foram determinados os teores de carbono fixo (CF), material volátil (MV) e cinzas (CZ), assumindo-se que esses parâmetros não são influenciados pelo processo de moagem. A inclusão do lodo resultou em aumento nos teores de carbono e materiais voláteis, além de uma redução no teor de cinzas.

GRÁFICO 3: CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA



Fonte: O autor (2025).

No estudo de Lima (2024), a adição de 20% de lodo à serragem de Pinus resultou em um leve aumento no teor de carbono fixo, que passou de 13,39% para 14,04%, além de uma elevação nos compostos voláteis, de 74,16% para 75,71%. Em contrapartida, o teor de cinzas apresentou um aumento mais significativo, subindo de 1,02% para 2,33%.

Já Juppa (2025), ao empregar a mesma proporção de lodo (20%) em *pellets* produzidos com BRS Capiáçu, observou comportamento distinto: o teor de carbono fixo caiu de 19,35% para 16,37%, e os voláteis também apresentaram redução, passando de 85,55% para 83,05%. Assim como no estudo anterior, o teor de cinzas aumentou, passando de 6,47% para 8,41%.

O maior teor de cinzas do lodo pode ser explicado pela elevada quantidade de compostos inorgânicos que normalmente constituem o material. Estes compostos inorgânicos presentes nas cinzas dificultam a eficiência da combustão, entretanto, estudos indicam que estes materiais podem ser utilizados para aplicação no solo como fonte de nutrientes agrícolas (Costa *et al.*, 2020; Silva *et al.*, 2019; Simão *et al.*, 2019).

4.2.1 Poder Calorífico Superior (PCS)

O PCS é a quantidade de calor liberado pela queima, de modo que a água proveniente desta queima esteja em estado líquido, e o PCI é a quantidade de calor liberado pela queima, de modo que a água proveniente da queima esteja em estado gasoso (Lima, 2010).

O poder calorífico superior (PCS) dos pellets TSa e TSb foram de 18,35 MJ·kg⁻¹, resultando em uma densidade energética de 17,524 J·g⁻¹. As demais análises não puderam ser realizadas na bomba calorimétrica devido a falha no equipamento utilizado, portanto foram calculados de acordo com a equação 7 e adotando o PCS para o lodo de 24,27 Kg.m⁻³ analisado por Juppa (2025). Simeone (2017) ao analisar *pellets* produzidos 100% de sorgo, encontrou um PCS de 17,66 J·g⁻¹, ficando bem próximo ao encontrado no presente trabalho.

TABELA 8 – ANÁLISES PELLETS

Análises	TSa	TSL20a	TSb	TSL20b	ABNT 17013-1
PCS (MJ Kg ⁻¹)	18,33	19,52	18,33	19,52	≥ 16,5
Densidade Energética (MJ g ⁻¹)	17,25	17,83	19,12	21,52	---
Densidade a granel (Kg m ⁻³)	670	628	612	638	500-750
Densidade aparente (Kg m ⁻³)	954,7	913,72	1041,7	1102,4	---
Diâmetro médio (mm)	6,7	6,8	6,7	6,55	---
Comprimento médio (mm)	15,25	17,45	17,35	18,2	---
Durabilidade Mecânica (%)	93,43	94,01	90,73	90,21	≥97
Teor de Finos (%)	14,4	19,3	10,4	16,63	≤1,5

FONTE: O autor (2025).

Segundo Lima (2024), a adição de lodo flotado resultou em um aumento no poder calorífico dos pellets, indicando um desempenho energético superior em comparação com outras biomassas. Esse resultado destaca o potencial dos pellets como uma fonte de energia eficiente, especialmente para aplicações térmicas, como o aquecimento de aviários, conforme avaliado neste trabalho. De forma semelhante,

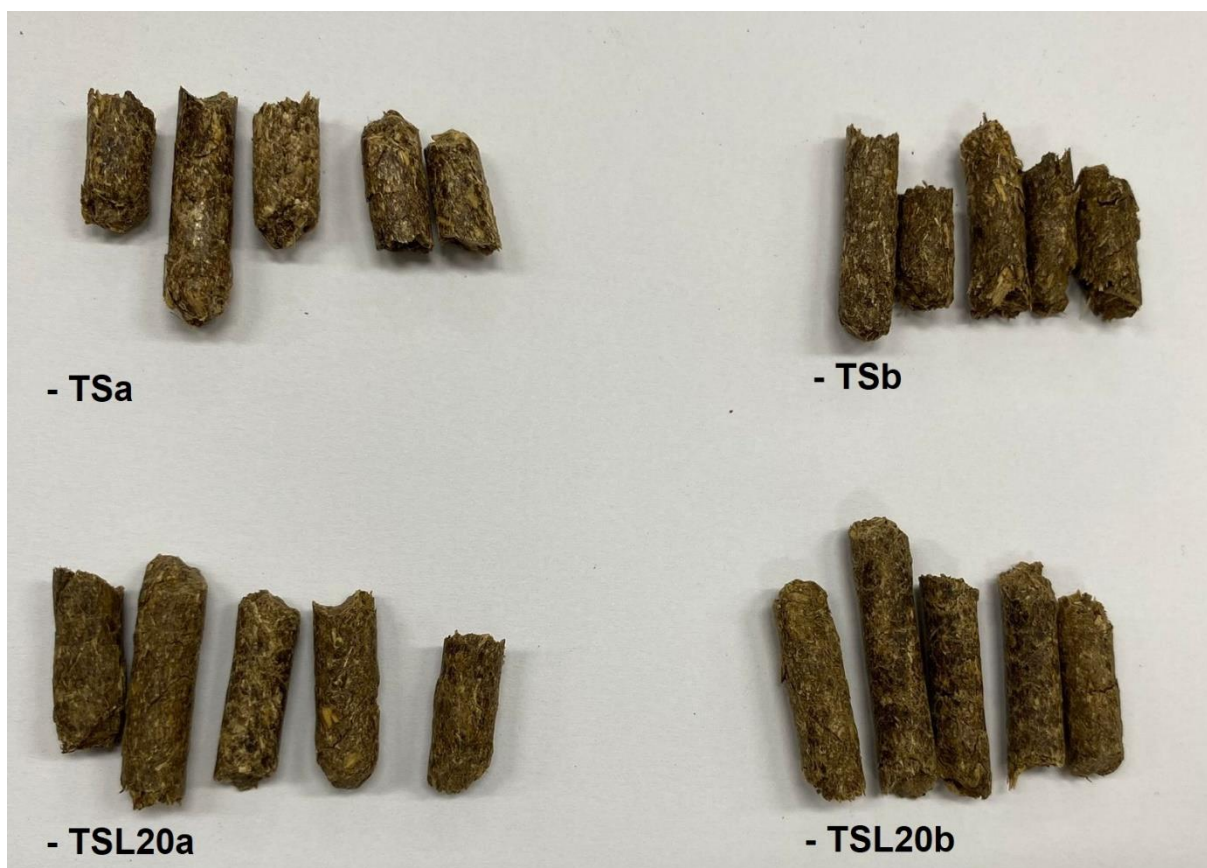
Andriola (2023) também verificou um aumento no poder calorífico ao incorporar 20% de lodo à biomassa de BRS Capiáu, elevando o valor de 15,1 para 17,4 MJ g⁻¹. Além disso, Mantovan (2022) ressalta que do ponto de vista energético os lodos possuem um potencial energético atraente que compreende a aplicação para o processo de combustão.

4.2.2 Densidade e densidade energética

Ao comparar os resultados obtidos neste estudo com os parâmetros de qualidade estabelecidos pela NBR 17013-1:2022 e com os dados apresentados por Juppa (2025), observa-se que os pellets produzidos demonstraram avanços relevantes, embora ainda não atendam plenamente aos padrões comerciais em determinados critérios. Um dos principais pontos de atenção é o teor de finos, que, apesar de inferior aos valores relatados em estudos anteriores, permanece acima do limite máximo de 1,5% definido pela norma. Esse resultado indica que os pellets apresentam certa fragilidade estrutural e propensão à geração de partículas soltas durante o manuseio e transporte. Nos estudos de Juppa (2025), ao analisar *pellets* de capiaçu com adições de lodo a maioria dos tratamentos também apresentou altos teores de finos, reforçando a recorrência desse desafio. Por sua vez, Simeone (2017) ao analisar *pellets* de sorgo obteve um teor de finos de 1,63%, valor ligeiramente acima do exigido pela norma, mas ainda consideravelmente inferior ao observado neste trabalho.

Em relação à durabilidade mecânica, os valores obtidos neste estudo foram considerados baixos comparado a norma ao exigido pela norma de *pellets* de pinus (NBR 17013-1), variando entre 90,21% e 94,1%, ficando abaixo do mínimo de 97% exigido pela NBR 17013-1:2022. Esses resultados indicam uma tendência à quebra dos pellets durante o manuseio, o que pode ser observado visualmente por características mais frágeis e quebradiças (Figura 21). Por outro lado, os pellets avaliados por Juppa (2025) apresentaram desempenho superior, com durabilidade variando de 89,51% a 98,05%, sendo que alguns tratamentos superaram o limite mínimo exigido. Além disso, Simeone (2017), ao analisar pellets produzidos a partir da biomassa de sorgo, obteve um índice de durabilidade de 98,37%, valor bem acima do observado no presente estudo, reforçando a necessidade de melhorias na resistência física dos pellets produzidos.

FIGURA 18: CARACTERISTICA DOS PELLETS



FONTE: O autor (2025).

Em relação à densidade a granel, todos os tratamentos avaliados neste estudo atenderam aos requisitos estabelecidos pela NBR 17013-1:2022, que define uma faixa aceitável entre 500 e 750 kg/m³. Os valores obtidos variaram de 612 a 670 kg/m³, sendo compatíveis com os resultados encontrados por Juppa (2025) ao analisar *pellets* produzidos com capiaçu e lodo. Já a densidade aparente apresentou variação entre 913,72 e 1102,4 kg/m³, também semelhantes aos dados de Juppa (2025), embora este tenha registrado valores ainda mais elevados em alguns tratamentos, como no caso do T 100% Capiaçu, que atingiu 1510,38 kg/m³, evidenciando uma maior compactação do material. Lima (2024) ao analisar *pellets* de serragem de pinus com diversas porcentagens de adições de lodo identificou que o aumento da proporção de lodo nos tratamentos tende a reduzir a densidade aparente dos pellets. Da mesma forma, Andrade (2023) ao analisar *pellets* compostos de capiaçu e lodo observou uma diminuição nos valores de densidade a granel à medida que a adição de lodo aumentava, reforçando a influência desse componente na estrutura física dos pellets.

Gomes (2017), ao avaliar pellets produzidos com sorgo, concluiu que o tratamento T1, composto por 100% de sorgo, apresentou os melhores resultados nas análises de densidade a granel ($735,11 \text{ kg/m}^3$), teor de finos (0,008%) e densidade energética ($11.104,8 \text{ MJ/g}$), sendo, portanto, o mais indicado para a produção de *pellets*.

A elevada densidade energética é uma característica desejável, pois indica uma maior liberação de energia por unidade de volume durante a queima. Dessa forma, quanto maior a densidade energética dos pellets, maior será a quantidade de energia que pode ser transportada ou armazenada no mesmo espaço, o que representa uma vantagem logística e operacional significativa (Pereira, 2014).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, focando principalmente em aproveitamento energético e qualidade dos *pellets*, foi possível concluir que o sorgo BRS-716 apresenta bom potencial como matéria-prima para a produção de *pellets*, especialmente quando submetido a uma moagem extra, condição essa sugerida pelos técnicos ao peletizar as primeiras amostras. Essa condição favoreceu a compactação do material e resultou em *pellets* com menor quantidade de finos e maior durabilidade mecânica. A presença de lignina no sorgo contribuiu para a coesão entre as partículas durante a peletização, facilitando a formação de um produto mais resistente.

Já o lodo flotado, demonstrou viabilidade para uso em misturas, desde que em proporções controladas. O lodo apresentou alto teor de cinzas e baixa capacidade de aglutinação, o que dificultou a formação de *pellets* estáveis quando usado em excesso. Ainda assim, na proporção de 20%, sendo essa a proporção máxima permitida pela Resolução Nº042 da SEMA (2008), no qual estabelece critérios para a queima de resíduos em caldeiras, foi possível produzir *pellets* com qualidade aceitável, considerando a proposta de aproveitamento de resíduos para geração de energia térmica.

Os valores de poder calorífico dos pellets ficaram entre 16,77 e 18,19 MJ/kg, mesmo com a inclusão do lodo. Isso indica que os materiais utilizados possuem viabilidade energética, podendo ser aproveitados como alternativa renovável, principalmente em processos industriais de combustão. Apesar de os *pellets* não atenderem completamente aos requisitos da norma ABNT NBR 17013:2022 que avalia *pellets* de madeira pinus, os resultados obtidos foram satisfatórios para um estudo inicial.

Este trabalho reforça a importância de buscar soluções sustentáveis para o reaproveitamento de resíduos agroindustriais, como o lodo, transformando-o em insumo energético ao invés de destiná-lo a aterros. A combinação com o sorgo, uma planta de fácil cultivo e boa produtividade, amplia as possibilidades de uso de biomassas alternativas na matriz energética brasileira.

Por fim, os dados obtidos apontam para a necessidade de mais pesquisas na área, visando o aprimoramento do processo de peletização, o uso de aditivos naturais que ajudem na compactação e a avaliação da viabilidade econômica em maior escala.

O aproveitamento de resíduos, aliado ao uso de fontes renováveis, se mostra uma estratégia promissora tanto do ponto de vista ambiental quanto energético.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, propõe-se uma análise mais detalhada dos *pellets* obtidos, juntamente com um estudo sobre a viabilidade econômica de sua produção em escala. Recomenda-se, ainda, o aprofundamento das avaliações relacionadas ao processo de queima, aos gases gerados durante a combustão e aos possíveis contaminantes presentes nas cinzas. Além disso, é relevante considerar a análise dos *pellets* após passarem por processos como torrefação e carbonização, visando uma melhor compreensão de sua viabilidade técnica e ambiental.

REFERÊNCIAS

- (ABIP), Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável Instituto Brasileiro *Pellets* Brasil Biomassa Consultoria Engenharia Tecnologia *Pellets* Brasil. **Projetos industrias sustentáveis biopellets sorgo**. 2024. Disponível em: https://www.pelletsbrasil.com/_files/ugd/f55c81_b9bd4efc3b104d029c32f70b89e0160a.pdf. Acesso em: 05 jun. 2025.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM D1102 – 84: **Standard Test Method for Ash in Wood**, 1984.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM D5865 –19: **Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke**, 2019.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM E871 – 82: **Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels**, 1982a.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM E872 – 82: **Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels**, 1982b.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Quantidade de usinas termelétricas por tipo**. 2024. Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/usinas-termeletricas-por-tipo>. Acesso em: 14 abr. 2025.
- ASSIS, Francielli Fernandes de. **Pelletização de cama de aviário e lodo centrifugado de diferentes proporções comparando a utilização em diferentes proporções comparando a utilização do bagaço de mandioca e amido com aglutinante**. 2022. 44 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia, Universidade Federal do Paraná, Palotina, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE *PELLETS* - **ABIPEL**. Disponível em: <http://www.abipel.com.br/>. Acesso em 27 abr. 2025.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1987) **NBR 9898 – Preservação e Técnicas de amostragem de afluentes líquidos e corpos receptores**. ABNT. Rio de Janeiro. RJ, BR
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **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 abr. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 17013:2022 – **Biocombustíveis sólidos – Pellets – Requisitos e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL (ABPA). **Relatório anual 2021. São Paulo, 2021**. Disponível em: <https://abpa-br.org/>. Acesso em: 7 abr. 2025.

BARRETO, E. J. F.; RENDEIRO, G.; NOGUEIRA, M. **Combustão e gasificação de biomassa sólida: soluções energéticas para a Amazônia**. LPT, MME, 2008.

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, Brasília, 2015.

BATISTA, R. J. **Tratamento de efluentes industriais: uma abordagem prática**. São Paulo: Érica, 2015.

BATISTA, V. A. P. **Avaliação bioenergética de sorgos biomassa, sacarino e forrageiro**. 2016. 81 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/9283/1/texto%20completo.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2025.

BAZZO, E. **Geração de vapor**. Editora da Universidade Federal de Santa Catarina, 1995.

BIZERRA, D. A. U. B. **Avaliação da palha de carnaúba in natura e carbonizada para produção de combustíveis sólidos: análise imediata, poder calorífico e densificação da biomassa**. 2017. 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/45496>. Acesso em: 10 abr. 2025.

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

BRAND, M. A. *et al.* **Mapeamento dos problemas associados à geração e tratamento das cinzas na combustão da biomassa florestal em caldeira**. Ciência Florestal, v. 31, n. 3, p. 1167–1192, 2021.

BRASIL. **Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de Energia 2030/ Ministério de Minas e Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética**. _ Brasília: MME: EPE, 2007

CAILLAT, S.; VAKKILAINEN, E. Large-scale biomass combustion plants: an overview. In: CAILLAT, S.; VAKKILAINEN, E. **Biomass combustion science, technology and engineering**. Philadelphia: Woodhead Publishing, 2013. Cap. 9, p. 189–224.

CARVALHO, F. B. et al. **Quality of black pellets of charcoal fines produced with different moisture content and drying time**. Revista Árvore, [S.L.], v. 48, p. 1-11, 2024. Sociedade de Investigações Florestais (SIF). <http://dx.doi.org/10.53661/1806-9088202448263752>.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Manual de orientação para o tratamento de efluentes de abatedouros de aves**. São Paulo, 2008.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: Editora da Unicamp, 2008.

COSTA, G. H. G.; CIARAMELLO, S.; ALCANTARA, G. U. **Sorgobiomassa e Eucalipto de 2 anos como biomassas para bioenergia**. In: CONGRESSO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE, 15., 2018, Poços de Caldas, MG. Anais [...]. Poços de Caldas: Instituto Federal de Educação de Minas Gerais, 2018. Disponível em: <http://www.meioambientepocos.com.br/Anais2018/Energias%20Renov%C3%A1veis/267.%20SORGO%20BIOMASSA%20E%20EUCALIPTO%20DE%202%20ANOS%20COMO%20BIOMASSAS%20PARA%20BIOENERGIA.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2025.

CRISÓSTOMO, M. C. et al. **Caracterização energética de madeira de E. grandis, Pinus sp., T. vulgaris e P. lecointei**. In: **Recursos Naturais: Energia de Biomassa Florestal**. p. 49–61, 2021. Disponível em: <http://www.editoracientifica.com.br/articles/code/210203270>. Acesso em: 7 abr. 2025.

DIAS, J.M.C. de S. et al. **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. 13. ed. Brasília: Embrapa, 2012.

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

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Uso da biomassa para a geração de energia**. 2016. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/155329/1/Doc-211.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2025.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA FLORESTAS (EMBRAPA FLORESTAS). **Sorgo-biomassa como alternativa à madeira para geração de energia**. 2024. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1167253/1/EmbrapaFlorestas-2024-Documentos394.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Atlas de eficiência energética Brasil 2024**. 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao->

857/Atlas%20da%20Efici%C3%Aancia%20Energ%C3%A9tica%20Brasil%202024.pdf. Acesso em: 24 abr. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco energético nacional 2018: ano base 2017**. Rio de Janeiro: EPE, 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 1 mai. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco energético nacional 2021: ano base 2020**. Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 1 mai. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco energético nacional 2024: ano base 2023**. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 15 abr. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Boletim mensal de energia – fevereiro 2021**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/boletins-mensais-de-energia/boletim-mensal-de-energia-fevereiro-2021>. Acesso em: 20 abr. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Papel da biomassa na expansão da geração de energia elétrica**. 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-457/Biomassa%20e%20Expans%C3%A3o%20de%20Energia.pdf#search=biomassa>. Acesso em: 30 abr. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Papel da Biomassa na Expansão da Geração de Energia Elétrica: documento de apoio ao PNE 2050**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2018.

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

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: 1 abr. 2025.

FAGNANI, E. **Reaproveitamento do lodo de flotador como biomassa**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2017.

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.

FAO. **Food and Agriculture Organization of the United Nations. The state of food and agriculture 2022**. Leveraging automation in agriculture for transforming agrifood

systems. Rome, FAO, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/cb9479en>. Acesso em: 10 de abr. de 2025.

FERREIRA, C. A. *et al.* **Gerenciamento de resíduos sólidos em abatedouros de aves.** Revista Brasileira de Gestão Ambiental, v. 12, n. 3, p. 143–154, 2018.

GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G. **Caracterização energética de pellets de madeira.** Revista da Madeira, v. 24, n. 135, p. 14-16, 2013. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Dorival-Garcia/publication/312071104_CHARACTERIZACAO_ENERGETICA_DE_PELLETS_DE_MADEIRA/links/586e343f08ae6eb871bcf7b7/CARACTERIZACAO-ENERGETICA-DE-PELLETS-DE-MADEIRA.pdf> Acesso em 01 abr. 2025.

GARCIA, Dorival Pinheiro. **Caracterização química física e termica dos pellets de madeira produzido no Brasil.** 2010. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade Estadual de São Paulo, Guaratiguetá, 2010.

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, 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.; *et al.* **Caracterização energética de pellets de madeira.** Revista da Madeira, v. 24, n. 135, p. 14-16, 2013. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Dorival-Garcia/publication/312071104_CHARACTERIZACAO_ENERGETICA_DE_PELLETS_DE_MADEIRA/links/586e343f08ae6eb871bcf7b7/CARACTERIZACAO-ENERGETICA-DE-PELLETS-DE-MADEIRA.pdf> Acesso em 06 abr. 2025.

GILLESPIE, G. D.; EVERARD, C. D.; FAGAN, C. C.; MCDONNELL, K. P. **Prediction of quality parameters of biomass pellets from proximate and ultimate analysis.** Fuel, v. 111, p. 771–777, 2013.

GOMES, Izabelle Rodrigues Ferreira *et al.* **Produção e caracterização de pellets de sorgo.** 2017. Disponível em: <https://proceedings.science/cbctem/trabalhos/producao-e-caracterizacao-de-pellets-de-sorgo-sorghum-bicolor?lang=pt-br>. Acesso em: 01 jun. 2025.

GOMES, L. A. **Aproveitamento do lodo gerado em estações de tratamento de esgoto e a relação com o meio ambiente.** 2019. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Produção e Gestão do Ambiente Construído) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

HUANG, Y. *et al.* **Biofuel pellets made at low moisture content – Influence of water in the binding mechanism of densified biomass.** Biomass And Bioenergy, [S.L.], v. 98, p. 8-14, mar. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.01.002>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **2024 registra recorde no abate de bovinos, frangos e suínos.** 2025. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/42898-2024-registra-recorde-no-abate-de-bovinos-frangos-e-suínos>. Acesso em: 15 abr. 2025.

JUPPA, Anna Maria Remonti. **Black pellets de capim elefante BRS capiaçu e lodo flotado proveniente de agroindustria.** 2024. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Bioenergia, Universidade Federal do Paraná, Palotina, 2025.

JUPPA, A. M.R. et al. **Pellets produzidos a partir da biomassa de capim elefante BRS Kurumi, lodo flotado e bagaço de mandioca.** Latin American Journal Of Energy Research, [S.L.], v. 11, n. 1, p. 209-217, 5 jun. 2024. Latin American Journal of Energy Research. <http://dx.doi.org/10.21712/lajer.2024.v11.n1.p209-217>.

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

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, Campinas, 2010.

LIMA, E. A. **Alternativa para estimar o preço da madeira para energia: comunicado técnico.** 260. ed. Colombo: Embrapa, 2010. 4 p.

LIMA, Victória Oliveira Diaz de. **Avaliação da qualidade de pellets produzidos a partir de diferentes misturas de lodo flotado e serragem de pinus para geração de calor.** 2024. 129 f. Tese (Doutorado) - Curso de Bioenergia, Universidade Federal do Paraná, Palotina, 2024.

LIPPEL. **Embrapa estuda o potencial da utilização do sorgo biomassa na geração de energia.** Lippel, 2025. Disponível em: <https://lippel.com.br/pt-BR/news/embrapa-estuda-o-potencial-da-utilizacao-do-sorgo-biomassa-na-geracao-de-energia>. Acesso em: 5 maio 2025.

MADALENA, L. C. S. **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.

MAKSIMUK, Y.; ANTONAVA, Z.; KROUK, V.; KORSAKOVA, A.; KURSEVICH, V. **Prediction of higher heating value (HHV) based on the structural composition for biomass.** Fuel, v. 299, p. 120860, 2021.

MANTOVAN, Fabiana de Marqui. **ESTUDO DA QUEIMA DE LODO FLOTADO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES EM CALDEIRA A BIOMASSA.** 2022. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Bioenergia, Universidade Federal do Paraná, Palotina, 2022.

MANTOVANI, E. C. *et al.* **Alternativas preliminares de processamento do sorgo-biomassa, visando a redução do teor de umidade da massa colhida para obtenção da maior eficiência energética. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2019.** 30 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n. 195). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/214396/1/Bol-195.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2025.

MANUELA BERGAMIM. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sorgo-biomassa é alternativa sustentável para geração de energia no Brasil.** 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/96087499/sorgo-biomassa-e-alternativa-sustentavel-para-geracao-de-energia-no-brasil>. Acesso em: 18 abr. 2025

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.** Bioresource Technology, v. 83, n. 1, p. 37–46, 2002.

MORALES, M. M. *et al.* **Eucalipto e sorgo-biomassa para geração de energia em Mato Grosso.** In: ABREU, D. C. de *et al.* (ed.). 3ª Vitrine tecnológica agrícola: atualidades na cultura do milho em sistema soja e milho-safrinha. Cuiabá, MT: Uniselva, 2022. p. 121-144.

NONES, D. L. **Cadeia produtiva de pellets e briquetes de biomassa residual para geração de energia em Santa Catarina.** 2014. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Florestal, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2014.

OBERNBERGER, I.; THEK, G. **The Pellet Handbook-The production and thermal utilisation of biomass pellets.** Earthscan. ISBN 978-1-84407-631-4, 2010.

OLIVEIRA, Luana Martins Schaly. **Umidade, granulometria e processamento térmico da ração sobre a produção de frangos de corte.** 2016. 62 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Zootecnia, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Rio Verde, 2016.

ORELLANA, B.B.M.A. **Utilização de resíduos de biomassa do Distrito Federal para fins energéticos.** 202 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais). Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2019

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

PADILHA, J.; *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. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br>. Acesso em: 26 abr. 2025.

Parrella, R.A.C.; Rodrigues, J.A.S. Tardin, F. D.; Damasceno, C. M. B.; Schaffert. R. E. **Desenvolvimento de híbridos de sorgo sensíveis ao fotoperíodo visando alta produtividade de biomassa**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2010.

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

PRADHAN, P. et al. **Production and quality analysis of biofuel pellets from Canadian forest and agricultural biomass**. Biomass And Bioenergy, [S.L.], v. 194, p. 107697, mar. 2025. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107697>

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

RANGEL, Igor Cassiano *et al.* **Normas e padrões para produção de biomassa compactada no mundo: Em breve o Brasil terá a sua ?** 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.18571/acbm.153>. Acesso em: 14 abr. 2025

RENDEIRO, G. **Combustão e gasificação de biomassa sólida**. Ministério de Minas e Energia (MME), 2008.

SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. DE. **Bioenergia e Biorrefinaria - Cana-de-açúcar & Espécies Florestais**. Universidade Federal de Viçosa, 2013.

SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. de. **Bioenergia e biorrefinaria: cana-de-açúcar & espécies florestais**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2013.

SANTOS, G. H. F. *et al.* **Biomassa como energia renovável no Brasil**. Revista Uningá, v. 29, n. 2, p. 06–13, 2017.

SARKER, T. R. *et al.* **Densification of waste biomass for manufacturing solid biofuel pellets: a review**. Environmental Chemistry Letters, v. 21, n. 1, p. 231–264, 2023.

SARKER, T. R.; NANDA, S.; MEDA, V.; DALAI, A. K. **Densification of waste biomass for manufacturing solid biofuel pellets: a review**. Environmental Chemistry Letters, v. 21, n. 1, p. 231–264, 2023. Springer.

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.

SENA, A. L. **Efeito da composição da biomassa nos parâmetros de processo e na qualidade dos pellets produzidos em peletizadora de matriz plana**. 2017. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Florestal, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2017.

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

SILVA, Diogo Aparecido Lopes. **O potencial inexplorado dos pellets**. Pesquisa Fapesp, São Paulo, v. 157, n. 320, p. 1-2, abr. 2022. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/o-potencial-inexplorado-dos-pellets/>. Acesso em: 05 jun. 2025.

SIMEONE, Maria Lúcia Ferreira *et al.* **Produção e caracterização de pellets de sorgo biomassa**. Brazilian Applied Science Review. Curitiba, p. 1689-1695. 25 set. 201. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BASR/article/view/478/476>. Acesso em: 05 jun. 2025.

SOUZA, M. M. *et al.* **Estimativa de poder calorífico e caracterização para uso energético de resíduos da colheita e do processamento de pinus taeda**. Floresta, Curitiba, v. 42, n. 2, p. 325-334, jan. 2011.

STACHOWICZ, P.; STOLARSKI, M. J. **Pellets from mixtures of short rotation coppice with forest-derived biomass: production costs and energy intensity**. Renewable Energy, [S.L.], v. 225, p. 120250, maio 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2024.120250>.

THEK, G.; OBERNBERGER, I. **The pellet handbook: the production and thermal utilization of biomass pellets**. 2012. Routledge.

Tolmasquim, M. T. **Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear**. Mauricio Tiomno Tolmasquim (coord). –EPE: Rio de Janeiro, Brazil, 2016

TUMULURU, J. S. **Effect of process variables on the density and durability of the pellets made from high moisture corn stoves**. Biosystems Engineering, v. 119, p. 44–57, 2014.

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.

VASSILEV, S. V. *et al.* **An overview of the composition and application of biomass ash**. Part 1: Phase–mineral and chemical composition and classification. Fuel, v. 105, p. 40–76, 2013.

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

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

VIVIAN, M. A. et al. **Potencial da madeira de Pinus glabra para produção de polpa celulósica.** Madera y Bosques, [S.L.], v. 26, n. 3, p. 1-12, 16 dez. 2020. Instituto de Ecología, A.C. <http://dx.doi.org/10.21829/myb.2020.2632058>

WERTHER, J.; OGADA, T. **Sewage sludge combustion.** Progress in Energy and Combustion Science, v. 25, n. 1, p. 55–116, 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(98\)00020-3](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(98)00020-3). Acesso em: 25 abr. 2025.

WERTHER, J.; SAENGER, M.; HARTGE, E.-U.; OGADA, T.; SIAGI, Z. **Combustion of agricultural residues.** Progress in Energy and Combustion Science, v. 26, n. 1, p. 1–27, fev. 2000.