

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

VICTÓRIA OLIVEIRA DIAZ DE LIMA

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE *PELLETS* PRODUZIDOS A PARTIR DE
DIFERENTES MISTURAS DE LODO FLOTADO E SERRAGEM DE PINUS PARA
GERAÇÃO DE CALOR

PALOTINA

2024

VICTÓRIA OLIVEIRA DIAZ DE LIMA

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE *PELLETS* PRODUZIDOS A PARTIR DE
DIFERENTES MISTURAS DE LODO FLOTADO E SERRAGEM DE PINUS PARA
GERAÇÃO DE CALOR

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

Orientadora: Profa. Dra. Adriana Ferla de Oliveira

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Lucas Konrad Burin

PALOTINA

2024

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

L732 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 / Victória Oliveira Diaz de Lima.
– Palotina, PR, 2024.

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

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

CDU 620.9

Bibliotecária: Aparecida Pereira dos Santos – CRB 9/1653

TERMO DE APROVAÇÃO

VICTÓRIA OLIVEIRA DIAZ DE LIMA

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE *PELLETS* PRODUZIDOS A PARTIR DE DIFERENTES MISTURAS DE LODO FLOTADO E SERRAGEM DE PINUS PARA GERAÇÃO DE CALOR

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação BIOENERGIA - UEL - UEM - UEPG - UNICENTRO - UNIOESTE - UFPR da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **VICTÓRIA OLIVEIRA DIAZ DE LIMA** intitulada: **AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE PELLETS PRODUZIDOS A PARTIR DE DIFERENTES MISTURAS DE LODO FLOTADO E SERRAGEM DE PINUS PARA GERAÇÃO DE CALOR**, sob orientação da Profa. Dra. ADRIANA FERLA DE OLIVEIRA, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Palotina, 06 de Setembro de 2024.

Assinatura Eletrônica

10/09/2024 15:13:40.0

ADRIANA FERLA DE OLIVEIRA

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

10/09/2024 20:38:36.0

FABIANO BISINELLA SCHEUFELE

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

10/09/2024 15:15:35.0

JOEL GUSTAVO TELEKEN

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Dedico esse estudo a minha mãe, Vanessa, e a minha Vó, Neusa (*in memoriam*), por sempre estarem ao meu lado me incentivando, apoiando e compreendendo e, além disso, me possibilitarem a ser quem sou hoje.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, primeiramente, pelo dom da vida, por todas as bênçãos concedidas, por sempre ter iluminado meu caminho e que assim continue sendo.

Agradeço à Universidade Federal do Paraná - Setor Palotina e a todos os meus professores pela oportunidade de um ensino de qualidade ao longo de toda a pós-graduação.

Agradeço pela infraestrutura e disponibilidade de uso do Laboratório de Química Orgânica e aos membros técnicos envolvidos no mesmo que possibilitaram o desenvolvimento do estudo.

Agradeço aos colegas Gustavo, David, Vitor, Pedro e Anna Maria pelo suporte fornecido quando necessário e a minha amiga Débora por todo companheirismo e auxílio nesse período.

A minha orientadora Prof.^o Dr.^a Adriana Ferla de Oliveira e ao meu coorientador Prof. Dr. Eduardo Lucas Konrad Burin, meus mais sinceros agradecimentos por toda orientação, dedicação e apontamentos para com o trabalho.

A Central Analítica Multiusuário do programa de pós-graduação em Engenharia Química da Unioeste agradeço pelas análises de termogravimetria realizadas.

Agradeço a banca, Prof. Dr. Joel Gustavo Teleken e Prof. Dr. Fabiano Bisinella por todos os apontamentos e considerações realizados, os quais ajudaram a enriquecer o trabalho.

Agradeço à toda minha família pelo apoio e respaldo.

Minha eterna gratidão a minha vó, Neusa, a minha mãe, Vanessa, e ao meu irmão, Julio Cesar, por todo suporte, incentivo, amor, confiança e, acima de tudo, pela compreensão. Eu amo vocês.

Agradeço ao Matheus por todo apoio, companheirismo, auxílio, compreensão e amor durante esse período.

Por fim, agradeço a todos que estiveram comigo nesse período.

Mesmo na aflição, quando minha alma clama no deserto, sei que o Senhor, meu pastor, não me abandona. Em sua fidelidade, encontro forças para continuar. O Senhor é o pastor que me conduz; felicidade e todo bem hão de seguir-me (Salmo 22).

RESUMO

Os desafios relacionados à destinação dos resíduos gerados nas indústrias de processamento de carne exigem a busca por alternativas sustentáveis de emprego desses resíduos, visando minimizar os impactos ambientais e os altos custos de descarte. Este estudo propôs uma solução ao avaliar o potencial energético de *pellets* fabricados a partir de serragem de pinus (SP) e diferentes proporções de lodo flotado (LF), gerado no tratamento de efluentes de frigoríficos de aves e peixes, para uso em aquecedores de ar em aviários. Foram produzidos e analisados *pellets* com as seguintes composições: 95% SP e 0% LF (TL0), 90% SP e 10% LF (TL10), 80% SP e 20% LF (TL20), 60% SP e 40% LF (TL40), 40% SP e 60% LF (TL60), 20% SP e 80% LF (TL80), e 0% SP e 95% LF (TL95). Os resultados mostraram que o aumento na proporção de lodo flotado nos pellets levou a um incremento no poder calorífico inferior (PCI), variando de 19,54 MJ.kg⁻¹ em TL0 a 21,84 MJ.kg⁻¹ em TL95. No entanto, a maior inclusão de lodo também resultou em um aumento no teor de cinzas e finos, com porcentagens variando de 1,41% a 6,13% para cinzas e de 4,40% a 39,8% para finos. Os testes de combustão foram realizados com os tratamentos TL0, TL10 e TL20, considerando que, conforme a SEMA N°42 (SEMA, 2008), o limite de 20% (m.m⁻¹) é estabelecido para a queima de resíduos em caldeiras. Esses testes mostraram que a co-combustão do lodo flotado ajudou a reduzir as emissões de CO, uma vez que TL0 (95% SP) ultrapassou o limite de 125 mg.Nm⁻³. As emissões de NOx permaneceram dentro dos limites regulatórios da SEMA 16 (560 mg.Nm⁻³) em todos os tratamentos: TL0 (156 mg.Nm⁻³), TL10 (453 mg.Nm⁻³) e TL20 (405 mg.Nm⁻³). Além disso, a análise da densidade calorimétrica dos gases de combustão, utilizando a Escala Ringelmann, indicou que todas as amostras testadas estavam em conformidade com os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA n° 8, evidenciando que os pellets são uma alternativa segura em termos de emissões atmosféricas. A eficiência térmica do aquecedor permaneceu constante, com 80% para TL0, 78% para TL10 e 79% para TL20. A capacidade térmica aumentou gradualmente de TL0 para TL20, variando de 170 kWth em TL0 para 171,95 kWth em TL10 e 186,54 kWth em TL20. Esses resultados sugerem que os pellets com lodo flotado podem representar uma alternativa viável e eficiente em comparação com outros combustíveis de biomassa.

Palavras-chave: Energia térmica. Biocombustíveis sólidos. Caracterização físico-químicas energética de pellets. Resíduos agroindustriais.

ABSTRACT

The challenges associated with the generation of floated sludge in meat processing industries require the search for sustainable disposal alternatives to minimize environmental impacts and high disposal costs. This study proposed a solution by evaluating the energy potential of pellets made from pine sawdust (SP) and different proportions of floated sludge (LF), generated from the effluent treatment of poultry and fish processing plants, for use in air heaters for poultry houses. Pellets with the following compositions were produced and analyzed: 95% SP and 0% LF (TL0), 90% SP and 10% LF (TL10), 80% SP and 20% LF (TL20), 60% SP and 40% LF (TL40), 40% SP and 60% LF (TL60), 20% SP and 80% LF (TL80), and 0% SP and 95% LF (TL95). The results showed that increasing the proportion of floated sludge in the pellets led to an increase in the lower heating value (LHV), ranging from 19.54 MJ.kg⁻¹ in TL0 to 21.84 MJ.kg⁻¹ in TL95. However, the higher inclusion of sludge also resulted in an increase in ash and fine content, with percentages ranging from 1.41% to 6.13% for ash and from 4.40% to 39.8% for fines. Combustion tests were carried out with treatments TL0, TL10, and TL20, considering that, according to SEMA N°42 (SEMA, 2008), the limit of 20% (m.m⁻¹) is established for the burning of residues in boilers. These tests showed that the co-combustion of floated sludge helped reduce CO emissions, as TL0 (95% SP) exceeded the limit of 125 mg.Nm⁻³. NO_x emissions remained within the regulatory limits of SEMA 16 (560 mg.Nm⁻³) in all treatments: TL0 (156 mg.Nm⁻³), TL10 (453 mg.Nm⁻³), and TL20 (405 mg.Nm⁻³). Additionally, the smoke density analysis, using the Ringelmann Scale, indicated that all tested samples complied with the limits set by CONAMA Resolution No. 8, demonstrating that the pellets are a safe alternative in terms of atmospheric emissions. The thermal efficiency of the heater remained consistent, with 80% for TL0, 78% for TL10, and 79% for TL20. The thermal capacity gradually increased from TL0 to TL20, ranging from 170 kWth in TL0 to 171.95 kWth in TL10 and 186.54 kWth in TL20. These results suggest that pellets with floated sludge can represent a viable and efficient alternative compared to other biomass fuels.

Keywords: Thermal energy. Solid biofuels. Energetic physicochemical characterization of pellets. Agro-industrial residues.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - OFERTA INTERNA DE ENERGIA EM 2023	20
FIGURA 2 – HISTÓRICO DA MATRIZ ENERGÉTICA MUNDIAL, 1990-2021	21
FIGURA 3 - PERDA DE MASSA EM FUNÇÃO DO TEMPO E DA TEMPERATURA DURANTE A COMBUSTÃO DA BIOMASSA.....	25
FIGURA 4 - ÁREA DE ÁRVORES PLANTAS EM 2022 (MILHÕES DE HECTARES)	27
FIGURA 5 - PRODUÇÃO DE PEIXES DE CULTIVO NO BRASIL, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PISCICULTURA.....	31
FIGURA 6 - FLUXOGRAMA DO TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO DE RESÍDUOS DE FRIGORÍFICOS	33
FIGURA 7 - ETAPAS GERAIS DO PROCESSO DE PELETIZAÇÃO	38
FIGURA 8 - FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DO PROCESSO DE PELETIZAÇÃO	38
FIGURA 9 - FLUXOGRAMA REPRESENTATIVO DAS ETAPAS DO PRESENTE ESTUDO	61
FIGURA 10 - TRITURADOR FORRAGEIRO, MARCA TRAMONTINA TRF25, MOTOR 2HP E SAÍDA LATERAL, UTILIZADO PARA PREPARO DO LODO FLOTADO	62
FIGURA 11 – PREPARO DAS MISTURAS.....	64
FIGURA 12 - MATRIZ PELETIZADORA JNMX 630 DA EMPRESA HMBIO	64
FIGURA 13 - ORGANIZAÇÃO DAS PENEIRAS PARA REALIZAÇÃO DA ANÁLISE DE PERFIL GRANULOMÉTRICO	66
FIGURA 14 - CILINDRO UTILIZADO PARA A DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE A GRANEL DOS <i>PELLETS</i>	68
FIGURA 15 - AQUECEDOR AGROBONA AB 4000 HIB UTILIZADO EM EXPERIMENTO	70
FIGURA 16 - ORGANIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS DE QUEIMA DE <i>PELLETS</i> REALIZADOS EM UM AVIÁRIO NO OESTE DO PARANÁ.....	71
FIGURA 17 - A) DUTOS DE ENTRADA E SAÍDA DE AR; B) ANÁLISE DE TEMPERATURA E VELOCIDADE NOS DUTOS DE SAÍDA DE AR QUENTE C) ANÁLISE DE VELOCIDADE E TEMPERATURA NO DUTO DE ENTRADA DE AR QUENTE.	72
FIGURA 18 - A) CHAMINÉ B) ANÁLISE DAS EMISSÕES GASOSAS	72

FIGURA 19 - ASPECTO DOS <i>PELLETS</i> PRODUZIDOS, TL0 A TL95.....	82
FIGURA 20 - RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO IMEDIATA E DE FINOS DOS <i>PELLETS</i> PRODUZIDOS.....	84
FIGURA 21 – ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA): A) LODO FLOTADO; B) SERRAGEM DE PINUS; C) TL0; D) TL10; E) TL20; F) TL40; G) TL60; H) TL80; I) TL95.....	89
FIGURA 22 - EMISSÕES DE CO E NO _x A PARTIR DA COMBUSTÃO DO TRATAMENTO TL0, 95% SERRAGEM DE PINUS.....	94
FIGURA 23 - EMISSÕES DE CO E NO _x A PARTIR DA COMBUSTÃO DO TRATAMENTO TL10, 10% DE LODO FLOTADO	95
FIGURA 24 - EMISSÕES DE CO E NO _x A PARTIR DA COMBUSTÃO DO TRATAMENTO TL20, 20% DE LODO FLOTADO	95
FIGURA 25 - ASPECTO DA FUMAÇA EMITIDA PARA OS TESTES COM A) TL0, B) TL10 E C) TL20 EM COMPARAÇÃO COM A D) ESCALA RINGELMANN	98
FIGURA 26 - RESULTADOS PROVENIENTES DO BALANÇO ENERGÉTICO NO AQUECEDOR DE AVIÁRIO MEDIANTE A COMBUSTÃO COM OS <i>PELLETS</i> DOS TRATAMENTOS TL0, TL10 E TL20.....	100

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COMPOSIÇÃO DAS CINZAS DE DIFERENTES BIOMASSAS COM BASE EM TRABALHOS DA LITERATURA	23
TABELA 2 - DESTINAÇÃO FINAL DE CADA TIPO DE RESÍDUO GERADO NO PROCESSO PRODUTIVO DOS PRODUTOS DE FLORESTAS CULTIVADAS.....	28
TABELA 3 - CARACTERIZAÇÃO DA SERRAGEM DE MADEIRA DE PINUS SSP.	29
TABELA 4 - CLASSIFICAÇÃO DE <i>PELLETS</i> A PARTIR DA NORMA NBR 17013-1	42
TABELA 5 - NORMAS REGULAMENTADORAS DE EMISSÕES GASOSAS.....	50
TABELA 6 - TRADICIONAIS CORRELAÇÕES DE ÍNDICES DE DEPOSIÇÃO, ESCÓRIA E INCRUSTAÇÃO.....	53
TABELA 7 - RESULTADOS DA LITERATURA PARA ÍNDICES DE ESCÓRIA E INCRUSTAÇÃO	54
TABELA 8 – TIPOS E SUBTIPOS DE AQUECEDORES UTILIZADOS NA AVICULTURA	56
TABELA 9 - COMPOSIÇÃO DOS TRATAMENTOS PRODUZIDOS	63
TABELA 10 – NORMAS UTILIZADOS PARA CARACTERIZAÇÃO IMEDIATA DAS MATÉRIAS-PRIMAS	66
TABELA 11 - NORMAS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS <i>PELLETS</i> PRODUZIDOS	67
TABELA 12 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE PERFIL GRANULOMÉTRICO DA SERRAGEM DE PINUS.....	77
TABELA 13 - ANÁLISE IMEDIATA, QUÍMICA E DE PODER CALORÍFICO DA SERRAGEM DE PINUS E UM COMPARATIVO COM ESTUDADOS DA LITERATURA.....	79
TABELA 14 - ANÁLISE IMEDIATA E DE PODER CALORÍFICO DO LODO FLOTADO E UM COMPARATIVO COM ESTUDADOS DA LITERATURA.....	79
TABELA 15 - RESULTADOS DE UMIDADE, ANÁLISE IMEDIATA, CINZAS E TEOR DE FINOS DOS <i>PELLETS</i> PRODUZIDOS.....	83
TABELA 16 - ANÁLISE IMEDIATA, TEOR DE CINZAS E TEOR DE FINOS (NBR 17030).....	83

TABELA 17 - DIMENSÕES DOS <i>PELLETS</i> PRODUZIDOS.....	85
TABELA 18 - DENSIDADE APARENTE E A GRANEL DOS <i>PELLETS</i> PRODUZIDOS	85
TABELA 19 - RESULTADOS DA DENSIDADE ENERGÉTICA E DO PODER CALORÍFICO DOS <i>PELLETS</i> PRODUZIDOS	87
TABELA 20 - FAIXA DE TEMPERATURA DOS EVENTOS TÉRMICOS OBSERVADOS NO TGA PARA O LODO FLOTADO, SERRAGEM DE PINUS E DOS TRATAMENTOS DE TL0 A TL95	90
TABELA 21 – DADOS DO SISTEMA AO LONGO DOS TESTES DE COMBUSTÃO DOS TRATAMENTOS.	92
TABELA 22 - RESULTADOS PROVENIENTES DO BALANÇO ENERGÉTICO NO AQUECEDOR DE AVIÁRIO MEDIANTE A COMBUSTÃO COM OS <i>PELLETS</i> DOS TRATAMENTOS TL0, TL10 E TL20.....	99
TABELA 23 - ANÁLISES QUANTITATIVA E QUALITATIVA DOS ÍNDICES DE ESCÓRIA E INCRUSTAÇÃO DE CINZAS DOS TRATAMENTOS TL0 A TL95	103
TABELA 24 - ANÁLISE DE REGRESSÃO DOS RESULTADOS DA ANÁLISE IMEDIATA, TEOR DE CINZAS (NBR), TEOR DE FINOS, DENSIDADE A GRANEL E APARENTE	106

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

C	- Carbono
Ca	- Cálcio
CO	- Monóxido de carbono ($\text{mg.N}^{-1}\text{m}^{-3}$)
CO ₂	- Dióxido de carbono
CZ	- Teor de Cinzas por análise imediata (%)
CZ NBR	- Teor de Cinzas pela NBR 17030
DE	- Densidade energética (GJ.m^{-3})
DTG	- Termogravimetria Derivada
H	- Hidrogênio
K	- Potássio
LF	- Lodo flotado
Mg	- Magnésio
Mn	- Manganês
MV	- Teor de Materiais Voláteis (%)
N	- Nitrogênio
NO _x	- Óxidos de nitrogênio ($\text{mg.N}^{-1}\text{m}^{-3}$)
O	- Oxigênio
P	- Fósforo
PCI	- Poder Calorífico Inferior (MJ.kg^{-1})
PCS	- Poder Calorífico Superior (MJ.kg^{-1})
P_1	- Energia perdida pelos gases de combustão (kW)
P_2	- Energia perdida pelas cinzas (kW)
P_3	- Energia perdida pelo carbono incombusto (kW)
P_4	- Energia perdida pela radiação e convecção (kW)
P_5	- Perdas relacionadas à emissão de CO (kW)
S	- Enxofre
Si	- Silício
SO _x	- Óxidos de enxofre ($\text{mg.N}^{-1}\text{m}^{-3}$)
SP	- Serragem de Pinus
TGA	- Análise termogravimétrica
TL0	- Mistura de pellets produzidas (95 % SP, 0% LF e 5% amido de mandioca)

TL10	- Mistura de pellets produzidas (85 % SP, 10% LF e 5% amido de mandioca)
TL20	- Mistura de pellets produzidas (75 % SP, 20% LF e 5% amido de mandioca)
TL40	- Mistura de pellets produzidas (55 % SP, 40% LF e 5% amido de mandioca)
TL60	- Mistura de pellets produzidas (35 % SP, 60% LF e 5% amido de mandioca)
TL80	- Mistura de pellets produzidas (15 % SP, 80% LF e 5% amido de mandioca)
TL95	- Mistura de pellets produzidas (0 % SP, 95% LF e 5% amido de mandioca)
TF	- Teor de Finos (%)
W	- Teor de Umidade (%)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 JUSTIFICATIVA	18
1.2 OBJETIVOS	19
1.2.1 Objetivo geral	19
1.2.2 Objetivos específicos.....	19
2 REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1 BIOMASSA PARA ENERGIA.....	20
2.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E ENERGÉTICA DE BIOMASSA.....	21
2.2.1 Análise termogravimétrica (TGA)	24
2.3 SERRAGEM DE PINUS	27
2.4 LODO FLOTADO	30
2.5 PELETIZAÇÃO DE BIOMASSA	37
2.5.1 Normas para parametrização de <i>pellets</i>	40
2.5.2 <i>Pellets</i> na geração de energia térmica	42
2.6 COMBUSTÃO DE BIOMASSA.....	46
2.6.1 Índice de incrustação e escória	52
2.7 AQUECIMENTO DE AVIÁRIOS	55
3 MATERIAL E MÉTODOS	60
3.1 COLETA E PREPARO DAS MATÉRIAS-PRIMAS.....	61
3.2 PELETIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS	63
3.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E ENERGÉTICA	65
3.3.1 Caracterização das matérias-primas	65
3.3.2 Caracterização dos <i>pellets</i> produzidos.....	67
3.3.3 Análise termogravimétrica (TGA) das matérias-primas e dos <i>pellets</i> produzidos	69
3.4 ENSAIOS EM CAMPO EM AQUECEDOR DE AR.....	69
3.4.1 Determinação da eficiência do aquecedor de ar	73
3.5 ANÁLISE CARBONO INCOMBUSTO	75
3.6 TENDÊNCIA DE DEPOSIÇÃO, ESCÓRIA E INCRUSTAÇÃO	76
3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA	76
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	77
4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS	77

4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E ENERGÉTICA DOS <i>PELLETS</i> PRODUZIDOS	81
4.3 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DAS MATÉRIAS-PRIMAS E DOS <i>PELLETS</i> PRODUZIDOS	88
4.4 COMBUSTÃO DE <i>PELLETS</i> EM AQUECEDOR DE AR	92
4.4.1 Parâmetros analisados a partir dos testes de combustão de <i>pellets</i> em aquecedor de aviário	92
4.4.2 Emissões gasosas durante a combustão de <i>pellets</i> em aquecedor de aviário	94
4.4.3 Eficiência térmica de um aquecedor de aviário a partir da combustão de <i>pellets</i>	99
4.5 TENDÊNCIA DE INCRUSTAÇÃO E ESCÓRIA	103
4.6 ANÁLISE DE REGRESSÃO.....	106
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	109
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	110
REFERÊNCIAS.....	111
ANEXO I – CERTIFICADO CALIBRAÇÃO TEXTO 340	124

1 INTRODUÇÃO

A combinação de fatores estruturantes como a vasta oferta de recursos naturais e insumos, o sistema de produção integrado e o status sanitário diferenciado foram determinantes para ganhos de produtividade e competitividade do Brasil no setor de processamento de carne (ABPA, 2024). A avicultura brasileira tornou-se uma das líderes mundiais, por conta dos fortes investimentos, emprego de alta tecnologia e a profissionalização do setor de processamento de carne ao longo das últimas quatro décadas. A produção avícola no Brasil tem registrado um crescimento significativo, consolidando o país como o segundo maior produtor mundial de carne de frango (14,83 milhões de toneladas), com um consumo per capita de 45,1 kg.hab⁻¹ (ABPA, 2024). Por sua vez, na piscicultura, o Brasil produziu 887.029 toneladas de peixes de cultivo em 2023, com crescimento de 3,1% sobre o resultado do ano anterior (Peixebr, 2024).

Para atender à crescente demanda do setor, houve um aumento na produção da carne de frango e de peixe, o que resultou em um aumento na geração de efluentes altamente poluentes, relacionados a lavagem das vísceras, da carcaça do peixe, água de transporte do peixe até o frigorífico, limpeza e esterilização dos utensílios e equipamentos, higienização dos pisos, paredes e bancadas. De acordo Fagnani *et al.* (2019), cada ave produz, em média, de 20 a 40 litros de efluentes, enquanto que para os peixes, segundo Guerrero *et al.* (1998), há uma geração de aproximadamente 5,4 L.kg⁻¹, ambos representando um desafio ambiental considerável. Para lidar com os resíduos gerados por esse setor, muitas empresas adotam o tratamento físico-químico dos efluentes. No entanto, esse processo gera uma quantidade considerável de lodo flotado residual que requer tratamento e descarte adequados para evitar impactos ambientais indesejáveis, Ferreira *et al.* (2018) estimaram que a produção brasileira de lodo de flotação de matadouro em 2015 foi de mais de 30 milhões de toneladas. A disposição desse lodo em aterros sanitários ou para compostagem é uma prática comum, mas acarreta custos elevados com transporte e resulta na produção de resíduos indesejáveis (GARCIA, 2016; ROSA *et al.*, 2014; ROSA, 2013; GARCIA, 2016; PINTO *et al.*, 2018).

Diante desses fatores, surge a necessidade de explorar alternativas para o tratamento e aproveitamento do lodo flotado gerado pela produção avícola/peixe. Uma abordagem promissora é sua utilização como biomassa para geração de energia

térmica. No contexto do setor de processamento de carnes, o uso de biomassas residuais mostra-se como uma alternativa viável e sustentável para a geração de energia térmica, com potencial para promover a gestão ambiental responsável e contribuir para a transição para fontes de energia mais limpas e renováveis (Oliveira, 2017). De acordo com ABPA (2024), empresas do setor estão investindo no aumento da utilização de fontes renováveis e, conforme o levantamento, 73% das empresas implantaram a utilização de biomassa.

De Sena *et al.* (2008), avaliaram a utilização do lodo flotado para geração de vapor, os autores verificaram que o lodo flotado possui alto poder calorífico (27,7 MJ. kg⁻¹), além disso, o teste de combustão realizado durante o estudo, com relação a proporção de lodo flotado/serragem de 4:1, revelou que as condições de funcionamento devem ser bem concebidas para atingir emissões de NO_x e SO₂ abaixo dos limites de emissão estabelecidos. Virmond *et al.* (2011) realizaram testes de combustão aplicando lodo flotado como único combustível, apresentando teor de materiais voláteis de 85% e 12,3% de cinzas e poder calorífico inferior de 22,6 MJ kg⁻¹, de acordo com os autores a influência das propriedades da biomassa e das condições operacionais nas emissões gasosas (CO, SO₂, NO_x e VOC) foi claramente observada nesses estudos. Mantovan *et al.* (2022) estudaram a utilização do lodo flotado misturado com cavacos de madeira de eucalipto em uma caldeira para geração de vapor, testes de campo foram realizados em um gerador de vapor considerando proporções de co-combustão de lodo flotado de até 20%. Os resultados mostraram que a eficiência aumentou com a adição de até 15% de lodo, devido à redução das perdas de energia nos gases de combustão e menores emissões de CO. No entanto, a eficiência caiu ligeiramente com 20% de lodo, devido ao aumento das perdas de energia e à dificuldade de manter a alimentação constante de lodo flotado.

A utilização de biomassa *in natura* para combustão não está isenta de desafios, como baixa densidade de energia, alto teor de umidade e falta de homogeneidade. Logo, como solução tem-se a utilização do lodo flotado na forma de *pellets*, o que pode mitigar esses problemas, oferecendo benefícios práticos, como uma queima mais uniforme do combustível na fornalha, eficiência otimizada nos processos produtivos e redução na mão de obra necessária para manuseio (Junginger *et al.*, 2009; Tavares; Tavares, 2015). Nesse contexto, o presente estudo foi motivado pela busca de uma alternativa sustentável para o aproveitamento de resíduos

industriais, promovendo uma abordagem alinhada à economia circular e à eficiência energética, com o potencial de contribuir para a redução de impactos ambientais.

1.1 JUSTIFICATIVA

A geração de lodo flotado nas indústrias aves e peixes acarreta desafios ambientais e econômicos significativos. No aspecto ambiental, o descarte inadequado desse resíduo pode resultar na contaminação do solo e da água devido à presença de substâncias químicas utilizadas no processo físico-químico das indústrias aves e peixes. Além disso, durante a decomposição do lodo, a emissão de gases nocivos, como metano, contribui para as mudanças climáticas e a poluição atmosférica. O impacto na biodiversidade também é uma preocupação, pois a disposição inadequada do lodo pode afetar negativamente ecossistemas naturais e habitats locais.

No âmbito econômico, as indústrias avícolas enfrentam desafios financeiros relacionados aos custos de destinação do lodo flotado. Os gastos com transporte, tratamento e conformidade com regulamentações ambientais são expressivos. Além disso, investimentos em processos de compostagem para lidar com o lodo requerem recursos adicionais, como infraestrutura específica e mão de obra especializada. Os riscos legais e regulatórios associados à gestão inadequada do lodo flotado também representam uma preocupação, podendo resultar em penalidades e multas para as empresas que não cumprem as normas ambientais vigentes.

Integrar soluções eficientes para lidar com o alto volume de lodo gerado nas indústrias avícolas é essencial. A busca por alternativas sustentáveis não apenas atende aos requisitos ambientais, mas também reduz os custos operacionais e promove práticas empresariais responsáveis. Estratégias inovadoras, como a utilização do lodo flotado na geração de energia térmica por meio de *pellets*, destacam-se como oportunidades para enfrentar esses desafios de forma integrada, proporcionando benefícios tanto para o meio ambiente quanto para a saúde financeira das indústrias avícolas. A utilização de lodo flotado no formato de *pellets* como fonte de energia térmica apresenta benefícios significativos em termos de eficiência energética, visto que os mesmos possuem alta densidade energética, o que significa que possuem um elevado poder calorífico em relação ao seu tamanho e peso, resultando em uma combustão mais eficiente e um aproveitamento máximo da energia produzida pelo combustível.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar o potencial energético de *pellets* de serragem de pinus somados a diferentes proporções de lodo flotado gerado no tratamento de efluentes de frigorífico de aves e peixes para posterior aplicação em aquecedores de ar para aviários.

1.2.2 Objetivos específicos

- Observar o efeito da inclusão de lodo flotado a serragem de *pinus* para produção de *pellets* com (0 - 95 %);
- Avaliar as características físico-químicas e energéticas da serragem de pinus, lodo flotado e dos *pellets* produzidos;
- Definir por análise termogravimétrica os parâmetros de combustão das matérias-primas e *pellets*;
- Avaliar os efeitos da peletização nos *pellets* pela determinação da densidade aparente, a granel e energética para os *pellets* produzidos;
- Investigar a eficiência térmica de aquecedor de ar para aviários e as emissões gasosas para diferentes *pellets* como combustíveis.

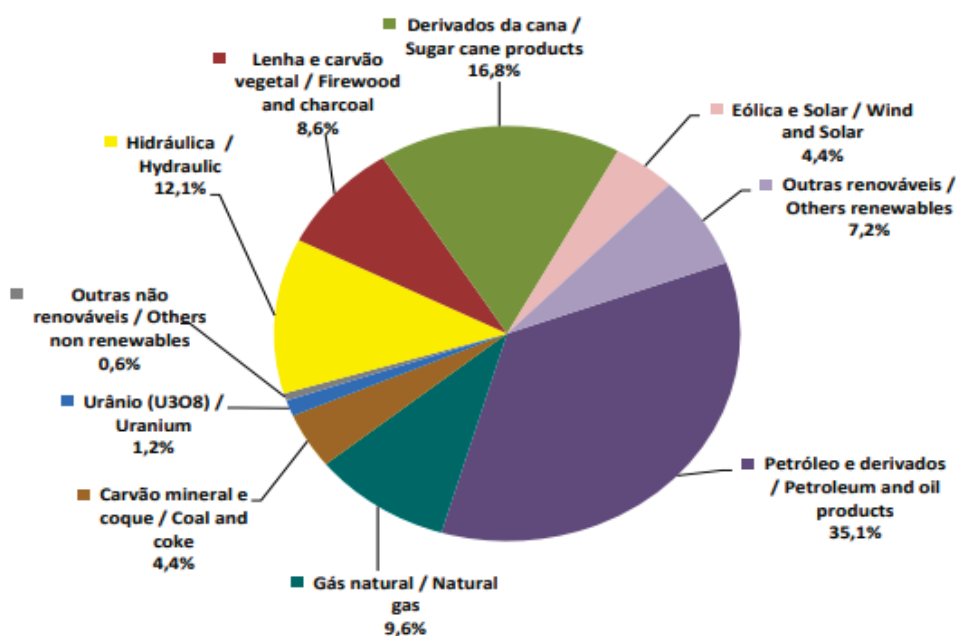
2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 BIOMASSA PARA ENERGIA

O equilíbrio entre a geração e o consumo de energia, com o mínimo de impacto negativo no meio ambiente, pode ser alcançado pelo desenvolvimento sustentável. Nesse sentido, a utilização de sistemas de energia a partir de fontes renováveis, acarretam em benefícios ambientais, energéticos e econômicos, como a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), fornecimento confiável e econômico de energia (Yilmaz; Selim, 2013).

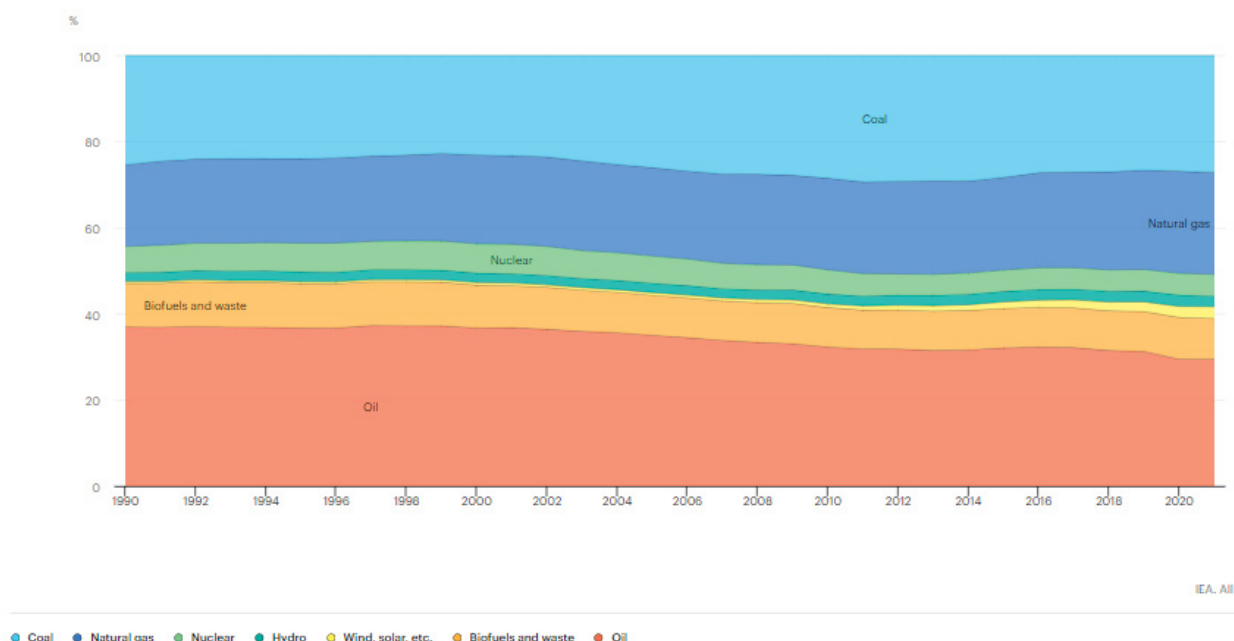
A Oferta Interna de Energia do Brasil (OIE), em 2023, foi representada em 49% por fontes renováveis, onde 25,4% estão relacionados com à energia proveniente da biomassa (FIGURA 1) (Empresa de Pesquisa Energética, 2023) . Já na Matriz Energética Mundial, em 2021, a biomassa correspondia a 9,47 % do total de fontes energéticas (FIGURA 2) (IEA, 2023). Em função da crescente preocupação e busca pelo uso de energia obtidas de fontes renováveis, resíduos de diversas origens surgem como alternativas interessantes para geração de energia (Stančín *et al.*, 2020).

FIGURA 1 - OFERTA INTERNA DE ENERGIA EM 2023



FONTE: EPE (2023).

FIGURA 2 – HISTÓRICO DA MATRIZ ENERGÉTICA MUNDIAL, 1990-2021



FONTE: IEA (2023).

A biomassa se caracteriza por todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica, o qual pode ser aplicado na geração de energia. Ela ainda é definida como a fonte mais importante de energia alternativa no mundo (De Moraes *et al.*, 2017). A biomassa utilizada para fins energéticos é classificada em três categorias: biomassa florestal, seus produtos, subprodutos e resíduos; biomassa energética agrícola, as culturas agroenergéticas e os resíduos e subprodutos das atividades agrícolas, agroindustriais e da produção animal; e resíduos urbanos (De Moraes *et al.*, 2017). O potencial energético de cada biomassa está relacionado com a matéria-prima utilizada, com tecnologia de processamento para sua obtenção e com as rotas de conversão (Cardoso, 2012; De Moraes *et al.*, 2017).

2.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E ENERGÉTICA DE BIOMASSA

A caracterização físico-química da biomassa se faz necessária para a escolha da rota tecnológica que será seguida para a transformação da mesma no energético necessário. As principais análises realizadas são: teor de umidade, análise imediata, poder calorífico superior e inferior.

A composição química elementar da biomassa baseia-se em três elementos, sendo eles, o carbono (C), o hidrogênio (H) e o oxigênio (O), possuindo também pequenas quantidades de nitrogênio (N) e certos elementos minerais. Por outro lado, os principais constituintes macroscópicos da biomassa vegetal são a celulose, a hemicelulose e a lignina, com teores que variam de 40% a 50%, 20% a 40% e 25%, respectivamente (Lorenci Woiciechowski *et al.*, 2020)

A massa de água presente na biomassa refere-se ao teor de umidade do material, o qual pode expresso tanto na base úmida (bu) quanto na base seca (bs), ou seja, na apresentação de resultados torna-se necessário evidenciar em que base os resultados são apresentados (Rendeiro, 2008). Elevados teores de umidade aumentam os custos de conversão termoquímica devido à vaporização e resultam em combustível com menor valor agregado, visto que esse parâmetro implica negativamente no Poder Calorífico do material (Niu *et al.*, 2019).

A análise imediata tem por objetivo quantificar os teores de umidade (W), materiais voláteis (MV), cinzas (CZ) e carbono fixo (CF) contidos na biomassa, valores os quais são essenciais para determinar em que proporção cada teor afetará no processo. Por exemplo, o teor de voláteis representa a fração mássica da biomassa que volatiliza em altas temperaturas, além disso, é um teor alto para muitos tipos de biomassa, o que a torna de fácil ignição (Caillat e Vakkilainen, 2013; Rendeiro, 2008). Por sua vez, o 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).

Nesse contexto, o conhecimento da composição química das cinzas é crucial quando se submete um material ao processo de combustão (Floriani *et al.*, 2010). A TABELA 1 apresenta os resultados da caracterização química das cinzas de diferentes combustíveis.

TABELA 1 - COMPOSIÇÃO DAS CINZAS DE DIFERENTES BIOMASSAS COM BASE EM TRABALHOS DA LITERATURA

Composição das cinzas	Lodo de aves e suínos ¹	Lodo de aves e suínos ¹	Cavaco de pinus ²	Cama de frango ²	Lodo Aves e Peixes ³	Serragem de pinus ³	Lenha de Eucalipto ⁴
Coagulante	Sulfato Férrico	-	-	-	Cloreto Férrico	-	-
Fe ₂ O ₃	32,40	2,28	5,42	0,35	50,24	9,9	0,34
CaO	17,40	43,05	7,85	44,3	3,88	9,9	40,10
MgO	1,30	3,51	2,42	3,2	0,72	7,2	6,15
Na ₂ O	1,7	1,80	1,19	0,47	2,10	2,9	1,50
K ₂ O	1,70	1,67	4,49	9,5	0,47	18,7	9,75
SiO ₂	4,90	18,73	53,49	4,5	3,76	30,4	8,87
Al ₂ O ₃	1,70	2,32	33,92	0,79	1,48	10,6	1,67
TiO ₂	0	0,13	1,93	0,02	0,02	0,9	0,04
P ₂ O ₅	36,30	23,28	0,65	12	37,04	7,4	4,02
MnO	n.d	0,10	-	-	0,06	-	1,11
SO ₄	n.d	3,14	-	-	0,23	-	-

¹Virmond et al. (2011); ²Masiá et al. (2007); ³MANTOVAN (2022); ⁴Peterson et al. (2016)

FONTE: A AUTORA (2024).

As cinzas provenientes da biomassa são predominantemente compostas por cálcio (Ca), silício (Si), potássio (K) e fósforo (P) (MLONKA-MĘDRALA *et al.*, 2020). Normalmente, Ca e Si são os elementos mais abundantes, porém também são encontradas quantidades significativas de outros nutrientes essenciais, como magnésio (Mg), K, P e manganês (Mn) (Steenari *et al.*, 1999).

Já para os lodos, a alta concentração de pentóxido de fósforo (P₂O₅) observada (TABELA 1) pode ser atribuída aos resíduos de aves, detergentes, coagulantes e outros produtos químicos utilizados durante o processo (Padilha *et al.*, 2010). Nesse contexto, o tipo de coagulante aplicado no tratamento de efluentes influencia diretamente na composição do lodo flotado centrifugado (VIRMOND *et al.*, 2011). Estudos utilizando policloreto de alumínio e sulfato férrico como coagulantes

mostraram maiores teores de óxidos de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3) devido à natureza dos coagulantes utilizados (Padilha *et al.*, 2019; Virmond *et al.*, 2011).

Diante disso, dependendo da composição das cinzas, durante processos de conversão termoquímica dos combustíveis sólidos, as mesmas podem causar problemas operacionais significativos, como escória e incrustação, prejudicando assim a eficiência energética da instalação e aumentando os custos de operação e manutenção (Mckendry, 2002).

O poder calorífico superior (PCS) e o poder calorífico inferior (PCI) são duas medidas importantes que descrevem a quantidade de calor liberada pela combustão completa de uma unidade de massa de uma substância. Essas medidas são essenciais para avaliar o potencial energético de diferentes materiais combustíveis. O PCS é a quantidade total de calor liberada durante a combustão completa de uma substância, incluindo o calor latente de vaporização da água formada durante a combustão. Isso significa que o PCS leva em consideração a condensação do vapor d'água produzido durante a combustão de um combustível. O PCS é expresso em unidades de energia por unidade de massa (MJ.kg^{-1}). Por outro lado, o PCI é a quantidade de calor liberada pela combustão completa de uma substância, excluindo o calor latente de vaporização da água formada durante a combustão. Isso significa que o PCI não leva em consideração a condensação do vapor d'água produzido durante a combustão de um combustível. O PCI é geralmente menor que o PCS e é expresso nas mesmas unidades de energia por unidade de massa (Sarker *et al.*, 2023; Mckendry, 2002). Além disso, *pellets* com um PCS mais baixo exigirão uma quantidade maior de espaço para atender a essa demanda (Maksimuk *et al.*, 2021; Gillespie *et al.*, 2013).

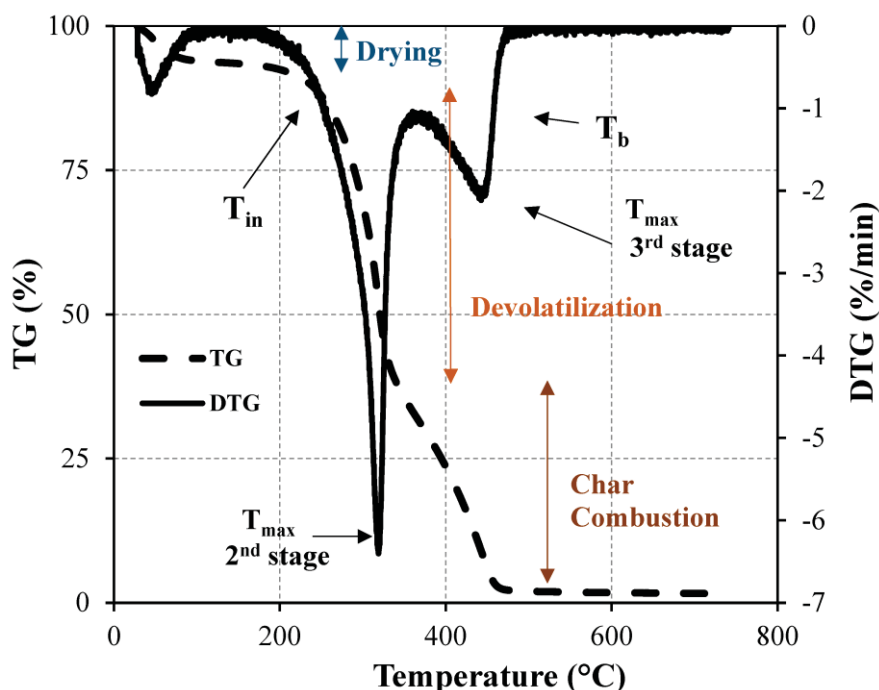
2.2.1 Análise termogravimétrica (TGA)

TGA é uma técnica de análise térmica na qual a massa de uma substância é observada em função da temperatura ou do tempo, à medida que a amostra é submetida a temperatura controlada e ambientes atmosféricos (Carrier *et al.*, 2011). O analisador termogravimétrico consiste em uma bandeja de amostra que é suportada por uma balança de precisão colocada em um forno onde a taxa de aquecimento e o ambiente podem ser controlados. Tempo, temperatura e peso são as três variáveis

continuamente medidas e registradas durante o experimento TGA (Kunh *et al.*, 2022). Um gás de purga (ou gás transportador), que pode ser inerte ou reativo, flui sobre a amostra para controlar o ambiente. O gás inerte mais utilizado é o nitrogênio, mas argônio e hélio também podem ser utilizados (Escalante *et al.*, 2022). Durante a experimentação, a mudança de massa da amostra para a temperatura é observada.

Tomando a primeira derivada dos dados registrados, conhecida como termogravimetria derivada (DTG), parâmetros importantes de caracterização do comportamento térmico são fornecidos (Kunh *et al.*, 2022). Esses parâmetros-chave são as temperaturas: T_{in} , que corresponde ao início da perda de peso e é definido como a temperatura na qual a taxa de perda de peso atinge 1%/min após o pico inicial de perda de umidade no perfil DTG; T_{max} é o ponto no qual ocorre a taxa máxima de reação; T_b é identificado quando o último pico chega ao fim e a temperatura na qual a amostra é completamente oxidada (Kunh *et al.*, 2022; Yuzbasi; Selçuk, 2011) (FIGURA 3).

FIGURA 3 - PERDA DE MASSA EM FUNÇÃO DO TEMPO E DA TEMPERATURA DURANTE A COMBUSTÃO DA BIOMASSA



FONTE: Fraga *et al.* (2018).

O formato das curvas termogravimétricas (TG) e curvas DTG depende de vários fatores, incluindo o tipo de biomassa; atmosfera e sua vazão; o programa de

aquecimento que inclui a taxa de aquecimento e a temperatura final; massa inicial; e o tamanho das partículas do combustível (Jenkins *et al.*, 1998). Estes constituem os principais fatores que afetam o TG e que determinarão o comportamento característico da decomposição térmica (Kunh *et al.*, 2022). A massa inicial e o tamanho das partículas devem ser os menores possíveis para evitar o efeito das limitações de transferência de calor e massa (Blasi *et al.*, 2001). Em relação à atmosfera, há duas opções a serem consideradas: a oxidativa ou a inerte. Uma atmosfera oxidativa afeta muito o comportamento de desvolatilização (Su *et al.*, 2012). A temperatura final deve ser alta o suficiente para a decomposição completa dos materiais carbonáceos. Finalmente, a taxa de aquecimento é um parâmetro importante, pois afeta muito a taxa de liberação dos voláteis devido à inércia térmica das partículas (Saeed *et al.*, 2016).

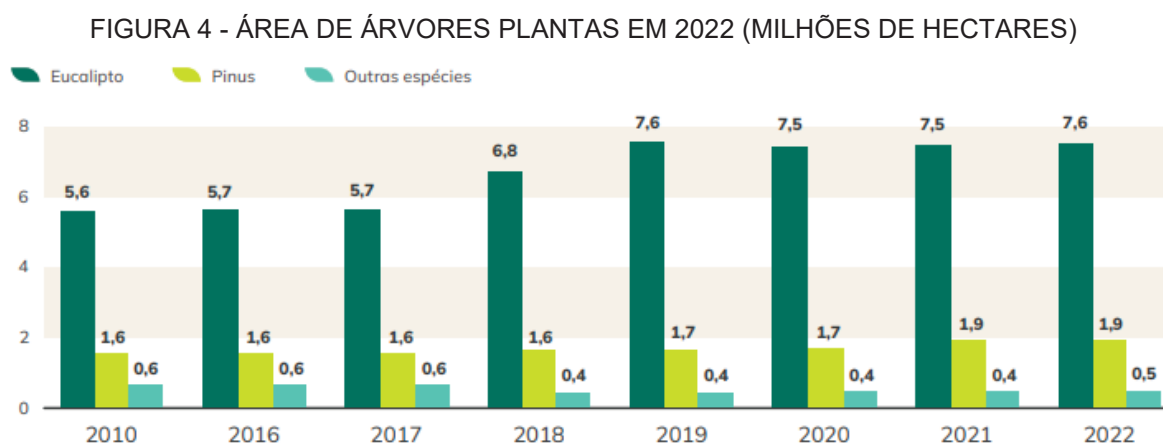
De acordo com a literatura, a decomposição do material lignocelulósico ocorre em diferentes temperaturas. Em média, as hemiceluloses estão entre 190 e 350 °C, e a celulose está entre 240 e 400 °C. A lignina se decompõe em uma faixa de temperatura mais abrangente do que as hemiceluloses e a celulose (Bridgwater *et al.*, 1999). As biomassas não lignocelulósicas têm uma composição química diferente em comparação com a biomassa lignocelulósica. Por exemplo, a biomassa de algas constitui principalmente proteínas, lipídios e carboidratos (Burhenne *et al.*, 2013 e Escalante *et al.*, 2022). Essa diferença de composição é traduzida em diferentes perfis de decomposição térmica para biomassa de algas.

Kunh *et al.* (2022), ao realizar análises TGA em amostras de lodo centrifugado, serragem e briquetes (produzidos a partir da mistura de lodo centrifugado com serragem), identificou três eventos térmicos principais. O primeiro evento, variando de 70 a 150 °C, está associado à desidratação. O segundo evento, ocorrendo entre 220-450 °C, corresponde à liberação de materiais voláteis, com temperaturas máximas de perda de massa de 349 °C para o lodo centrifugado e 354 °C para a serragem, indicando, de acordo com os autores, a decomposição de carboidratos e lipídios no lodo centrifugado e de hemicelulose e celulose na serragem. O terceiro evento, relacionado à combustão do carbono fixo, foi observado entre 450-680 °C para o lodo, envolvendo materiais orgânicos biodegradáveis e não biodegradáveis, e entre 450-600 °C para a serragem, com materiais orgânicos semelhantes. Eventos térmicos semelhantes foram observados para os briquetes,

mostrando pouca diferença no processo de combustão comparado aos materiais precursores.

2.3 SERRAGEM DE PINUS

Em 2022, quando comparado ao ano de 2021, houve um aumento de 0,3% na área de árvores plantadas no Brasil, totalizando uma área plantada de 9,94 milhões de hectares. Entre as espécies plantadas tem-se 76% da área composta pelo cultivo de eucalipto, com 7,6 milhões de hectares, e 19% de *pinus*, com aproximadamente 1,9 milhão de hectares. Além desses cultivos, existem cerca de 500 mil hectares plantados de outras espécies, entre elas a seringueira, acácia, teca e paricá (FIGURA 4). Cerca de 89% dos plantios de *pinus* se concentram na região Sul, sendo o Paraná e Santa Catarina os principais estados produtores (IBÁ, 2023).



FONTE: IBÁ (2023)

Painéis, pisos laminados, madeira serrada, madeira tratada, carvão vegetal, celulose e papel são alguns dos produtos gerados a partir da indústria madeireira. No entanto, para isso o setor acaba gerando resíduos durante o processo produtivo, tais como serragem de madeira, que é um sólido que possui potencial para ser utilizado de forma eficiente e sustentável. Uma prática de sustentabilidade é a economia circular, ou seja, a reutilização desses resíduos, o que vem sendo alvo de importantes investimentos do setor madeireiro (IBÁ, 2023) (TABELA 2).

TABELA 2 - DESTINAÇÃO FINAL DE CADA TIPO DE RESÍDUO GERADO NO PROCESSO PRODUTIVO DOS PRODUTOS DE FLORESTAS CULTIVADAS

Destinação Final	%	Resíduos gerados no processo produtivo
Mantido no campo como proteção do solo, destinado para compostagem	17,2	Cascas, galhos, folhas, lama de cal, cinza de caldeira e outros
Reciclagem	2,1	Dregs de grits, lodo, cinzas, sucata, plástico, papelão, casca, serragem e pereira ETE etc.
Destinados para geração de energia	63,6	Cascas, galhos, folhas, cavacos, serragem e licor preto
Reutilizados como matéria-prima pelo setor de árvores plantadas	3,9	Serragem, aparas de papel, lama de cal e cinzas de caldeira
Reutilizados como matéria-prima por outros setores industriais	1,8	Aparas de papel, lama de cal, resíduos não perigosos e outros
Encaminhados para aterros	4,8	Grits, dregs e lama, oriundos do processo de recuperação, resíduos não perigosos e outros
Outros destinos, inclusive coprocessamento	6,6	Diversos tipos de resíduos já especificados acima e outros não especificados

FONTE: IBÁ (2022)

Em 2021, 63,6% das empresas associadas à IBÁ direcionaram os seus resíduos industriais e florestais para geração de energia, um aumento em relação ao ano anterior de 6,4 pontos percentuais (IBÁ, 2023). Essa destinação pode ocorrer a partir da produção de *pellets*, na sua forma *in natura* ou em mistura com outros resíduos, com o objetivo de fazer com que o material tenha maior valor agregado. Nesse contexto, tem-se estudos da mistura de resíduos lignocelulósicos com resíduos industriais, de forma a melhorar a aglutinação e, conseqüentemente, a qualidade do *pellet* (Garcia *et al.*, 2013; Nascimento *et al.*, 2006).

Nesse cenário, inúmeros estudos têm como objetivo caracterizar a serragem de *pinus* por meio da análise imediata (que engloba o teor de umidade (W), materiais voláteis (MV), cinzas (CZ) e carbono fixo (CF), análise química (envolvendo a avaliação de lignina, celulose e hemicelulose) e determinação do poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) (TABELA 3).

TABELA 3 - CARACTERIZAÇÃO DA SERRAGEM DE MADEIRA DE PINUS SSP.

Autores	Chan; Tanksale (2016)	Liu et al. (2018)	Pereira (2021)	Carrillo- Parra et al. (2020)	Crisóstomo et al. (2021)	Cai et al. (2017)
Umidade (%)						
W	7,7	3,66		10,14	-	-
Análise Imediata, base seca (%)						
MT	84,1	79,72*	85,61	88,83	84,19	-
CZ	0,8	0,51*	0,33	0,36	0,3	-
CF	15,1	16,11*	14,04	10,81	15,51	-
Análise química (%)						
Lignina	-		-	25,02	-	25-35
Celulose	-		-	56,64	-	45-50
Hemicelulose	-		-	14,14	-	25-35
Análise elementar, base seca (%)						
C	50,1	49,10	47,18	-	-	-
H	6,2	5,55	7,06	-	-	-
O	42,8	44,99	45,42	-	-	-
N	0,12	0,45	-	-	-	-
S	0,03	-	-	-	-	-
Análise de Poder Calorífico, base seca (MJ.kg⁻¹)						
PCS	-		20,09		20,46	-
PCI	-	17,77	18,54		20,44	-

*base úmida

FONTE: A autora (2024)

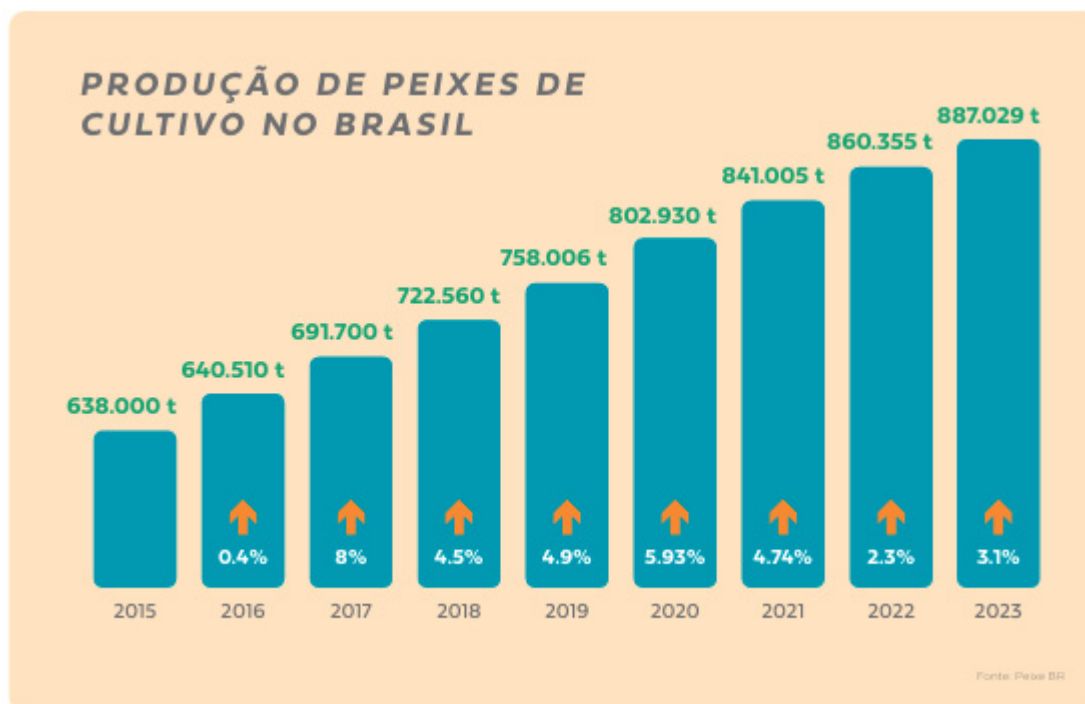
Por meio dessas análises de caracterização imediata, elementar, química e determinação do poder calorífico, busca-se obter dados detalhados que contribuam para uma compreensão mais profunda das propriedades da serragem de *pinus*, ao mesmo tempo em que se identificam as possíveis aplicações desse material, uma vez que tais características podem apresentar variações em função da idade, corte e do manejo da espécie, além da região de cultura (Carrillo-Parra *et al.*, 2020; Crisóstomo *et al.*, 2021).

2.4 LODO FLOTADO

A produção de carne de frango no Brasil tem aumentado constantemente ao longo dos anos. De acordo com o relatório anual de 2023 da ABPA (Associação Brasileira de Proteína Animal), o Brasil produziu 14,524 milhões de toneladas de carne de frango em 2022, o que torna o país o segundo maior produtor do (ABPA, 2023). Nesse sentido, é de conhecimento geral que o crescimento do número de frigoríficos de aves tem provocado um aumento na geração de efluentes destes que, por sua vez, são altamente poluentes e podem, se descartados de forma inadequada, causar sérios problemas ambientais. Por conseguinte, a produção de efluente varia de 20 a 40 litros por ave, sendo 25 litros um valor comum, decorrente do uso excessivo de água (Fagnani *et al.*, 2019).

Em 2023, a produção brasileira de peixes de cultivo alcançou cerca de 887 toneladas, conforme relatado pela Associação Brasileira da Piscicultura (2024) (FIGURA 5). Esse número representa um aumento de 3,1% em comparação com as 860 toneladas produzidas em 2022. Desde 2014, quando a Associação Brasileira da Piscicultura começou a registrar os dados, a produção de peixes de cultivo aumentou em 48,6%, o que equivale a um acréscimo de 281.555 toneladas ao longo de nove anos. De acordo com a mesma, esse progresso é atribuído ao aprimoramento constante de toda a cadeia produtiva.

FIGURA 5 - PRODUÇÃO DE PEIXES DE CULTIVO NO BRASIL, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PISCICULTURA



Fonte: Associação Brasileira da Piscicultura (2024).

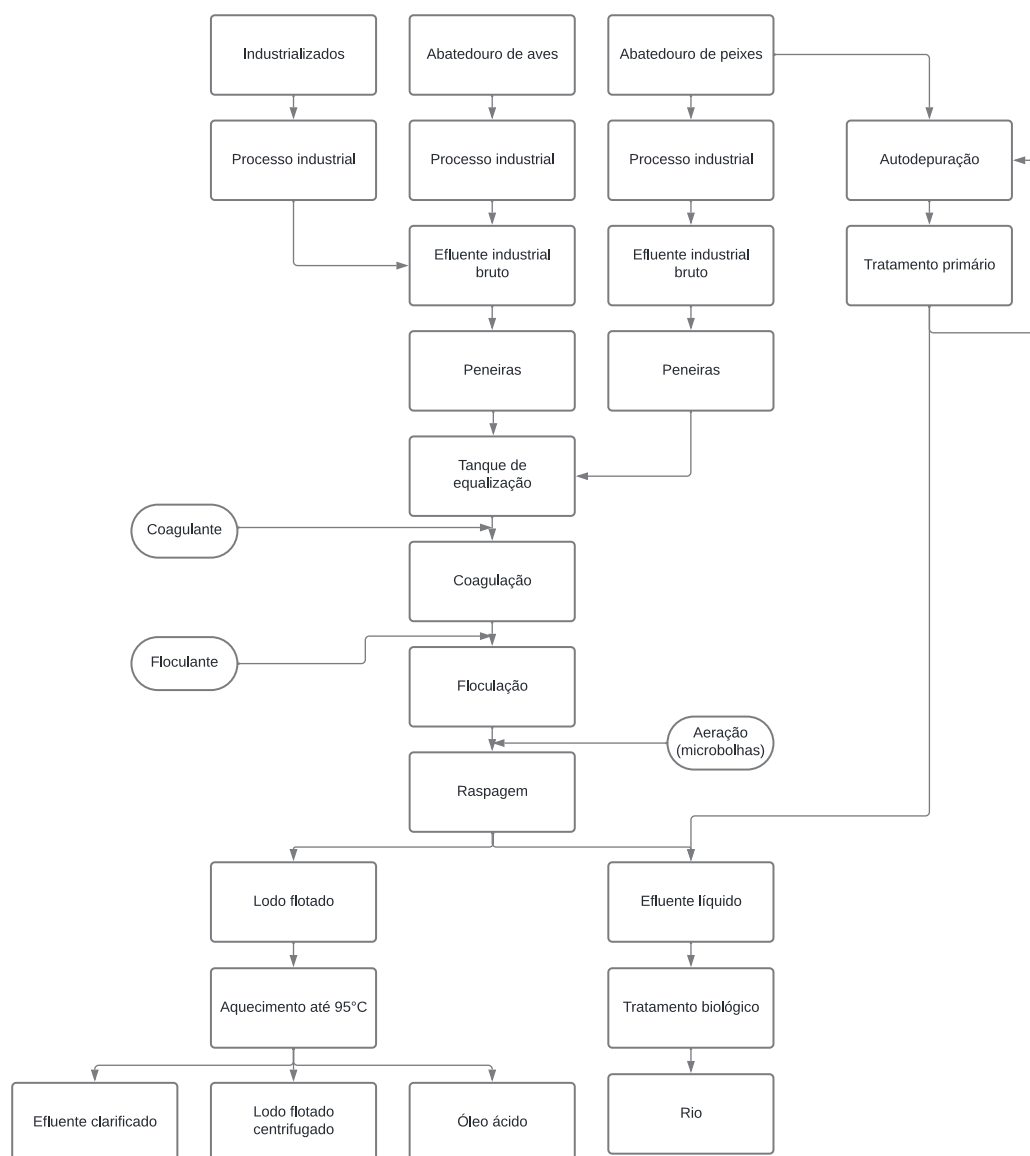
A tilápia permanece como o peixe mais cultivado na piscicultura brasileira. No último ano, em todo o país, foram produzidas 550.060 toneladas, o que representa 63,93% da produção nacional de peixes de cultivo e um aumento de 3% em relação às 534.005 toneladas de 2021. Dada a demanda interna e global, a tendência é que essa expansão continue e até se intensifique nos próximos anos. O estado brasileiro que lidera a produção de tilápia é o Paraná, contribuindo com mais de 34% do volume total. Em 2022, os paranaenses cultivaram 187.800 toneladas da espécie, um aumento de 3,2% em relação ao ano anterior.

Ainda sobre o setor de piscicultura, a partir do processamento de peixes há a geração de um efluente de abatedouro proveniente da lavagem das vísceras, da carcaça do peixe, água de transporte do peixe até o frigorífico, limpeza e esterilização dos utensílios e equipamentos, higienização dos pisos, paredes e bancadas. De acordo com Guerrero *et al.* (1998) a produção desse efluente se encontra em torno de 5,4 L.kg⁻¹ de peixe processado.

O processo de tratamento físico-químico de efluentes é empregado como solução e possui uma sequência específica para garantir a remoção de materiais grosseiros, partículas de gordura e material orgânico suspenso (FIGURA 6).

Inicialmente, há o peneiramento para separar os elementos mais grosseiros. Em seguida, o efluente é homogeneizado e recebe a adição do coagulante para desestabilizar as partículas sólidas. O floculante é então introduzido para agrupar essas partículas em flocos, facilitando a separação. Posteriormente, microbolhas são injetadas no reator, fazendo com que as partículas sejam levadas até a superfície para remoção por processos físicos como raspagem ou sucção (Padilha *et al.*, 2019; Unfriede; Yoshi, 2012). O material flotado resultante desse processo é aquecido (95 °C) e enviado para um equipamento de centrifugação, onde é separado em três fases: óleo, água (efluente clarificado) e lodo flotado centrifugado (Unfriede; Yoshi, 2012). O óleo extraído é comercializado, o efluente clarificado passa pelo sistema biológico de tratamento, e o lodo flotado é destinado a compostagem. Contudo, esse método gera uma quantidade considerável de lodo residual que demanda tratamento e descarte adequados para evitar impactos ambientais indesejáveis, como a poluição da água, ar e solo, além da geração de resíduos como chorume e metano (CH₄) (Garcia, 2016; Pinto *et al.*, 2018). Empresas frequentemente optam pela disposição desse lodo para a compostagem/aterros sanitários, gerando esses resíduos indesejáveis e, além disso, resulta em custos elevados com transporte (Garcia, 2016; Rosa *et al.*, 2014; Rosa, 2013).

FIGURA 6 - FLUXOGRAMA DO TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO DE RESÍDUOS DE FRIGORÍFICOS



FONTE: Adaptado de De Sena *et al.* (2008), Fagnani (2017) e Mantovan (2022).

O lodo flotado destaca-se por sua faixa de PCI, em base seca, variando de 26,6 MJ.kg⁻¹ a 28,2 MJ.kg⁻¹, e pela presença significativa de fração orgânica. Os teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo situam-se aproximadamente na faixa de 82% a 92,88%, 5,7% a 12,8% e 6,53% a 17,08%, respectivamente. Além disso, a análise elementar desse material revela teores máximos de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, enxofre, cloro, ferro e potássio de até 63,66%, 9,5%, 26,87%, 9,74%, 0,76%, 0,3%, 0,2% e 1,03%, respectivamente (Virmond *et al.*, 2011; Sena *et al.*, 2008; Padilha *et al.*, 2019; Virmond *et al.*, 2008); Fagnani, 2017; Mantovan, 2022).

Um elevado teor de nitrogênio resultará em maior formação de NO_x . Além disso, em zonas de altas temperaturas na fornalha, pode ocorrer a formação de NO_x pela dissociação do N_2 presente no ar. Nesse sentido, vários estudos vêm sendo realizados empregando lodo de ETE como biomassa combustível para geração de energia e os resultados demonstram a viabilidade e a possibilidade de agregar valor aos mesmos (Baker *et al*, 2021).

O tratamento físico-químico de águas residuais da indústria de carnes é usado para aumentar a eficiência da remoção de matéria orgânica e gera grandes quantidades de lodo. No estudo conduzido por Sena *et al.* (2008), examinaram-se as características dos lodos resultantes da aplicação de diferentes agentes coagulantes. Estes incluíram o cloreto férrico e sulfato férrico, produzidos em laboratório, o sulfato férrico combinado ao floculante Flonex 9073, fabricado em escala industrial, e a serragem. O tratamento usando sulfato férrico comercial como coagulante para essa água residual específica proporcionou altas remoções de matéria orgânica, diminuindo consideravelmente a quantidade de material residual a ser tratado em sistemas biológicos e também permitindo a obtenção de 0,83-0,87 kg de combustível de biomassa para cada m^3 de água residual tratada. Os resultados do estudo revelaram que tanto os lodos produzidos em ambiente laboratorial ($26,6 - 27,7 \text{ MJ.kg}^{-1}$) quanto os industriais ($28,2 \text{ MJ.kg}^{-1}$) exibiram um alto poder calorífico, teores elevados de carbono, nitrogênio e oxigênio, e uma significativa presença de cinzas se comparados à serragem. Ao realizar a análise elementar da serragem e do lodo com cloreto férrico, não se identificou a presença de enxofre (S), como era previsto, devido à ausência desse elemento tanto no coagulante quanto na composição da biomassa vegetal. Para avaliar as emissões gasosas provenientes da combustão, foram realizados testes em um combustor piloto, utilizando uma mistura do lodo produzido em escala industrial (com 15% de umidade) e serragem na proporção de 4:1, os resultados das emissões de CO e SO_2 foram registrados em 102,67 e 119,56 mg.Nm^{-3} , respectivamente, estando dentro dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA N° 316 (CONAMA, 2002), os quais determinam limites de 124,88 e 560 mg.Nm^{-3} para ambos os poluentes, respectivamente. Ressalta-se que, quando observado o NO_x , o mesmo ultrapassou os parâmetros regulamentares brasileiros, excedendo o limite de 560 mg.Nm^{-3} , em virtude da elevada quantidade de nitrogênio presente no biocombustível e da alta temperatura durante o processo de combustão.

Meneghini *et al.* (2015) investigou a viabilidade da co-combustão de lenha e lodo de um frigorífico em proporções de 10%, 15% e 20% em uma caldeira projetada para a queima de lenha. O estudo concluiu que a queima de lodo de frigorífico em concentrações superiores a 15% resultou em emissões de gases acima dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA n° 382 de 2006. Além disso, a queima dessa mistura aumentou consideravelmente a produção de cinzas na caldeira, em 25%, devido ao alto teor de cinzas no lodo (17,5%), que é superior ao da lenha. Os testes realizados indicaram que o rendimento térmico da caldeira variou, sendo de 79%, 81% e 84% para 10%, 15% e 20% de lodo, respectivamente, para a determinação da eficiência os autores consideraram a vazão mássica de vapor, entalpia de vapor saturado, a entalpia da água de alimentação da caldeira, a vazão mássica do combustível e o poder calorífico inferior do combustível. Isso evidenciou um aumento na eficiência energética da caldeira e uma redução no consumo de lenha com a adição do lodo, embora tenha sido observado um ponto negativo em relação às emissões gasosas.

Virmond (2007) analisou o potencial de aproveitamento do lodo proveniente do tratamento inicial de efluentes de um frigorífico como biomassa para combustão. O estudo considerou suas propriedades físico-químicas e o controle das emissões de poluentes durante a queima. Também investigou a queima do cavaco de madeira e sua combinação com o lodo, monitorando os gases produzidos. Ao incorporar 10% em massa de lodo ao cavaco, houve um incremento de cerca de 2% na potência térmica nominal do sistema, além de uma redução no consumo de cavaco. Contudo, ambos os processos de queima demonstraram baixa eficiência. O autor destaca a necessidade de otimizar cada etapa do processo de combustão para atingir máxima eficiência e minimizar a geração de produtos indesejáveis. O estudo ressalta a importância da escolha do coagulante usado no tratamento inicial do efluente do frigorífico, pois influencia na composição do lodo. Elementos como cloro presentes no coagulante podem resultar na formação de compostos poluentes, como dioxinas e furanos, durante a combustão. Portanto, otimizar a tecnologia de combustão e selecionar cuidadosamente a biomassa são cruciais para reduzir os impactos ambientais e aumentar a eficiência do processo.

O estudo de Ozdemir *et al.* (2022) teve como objetivo principal converter resíduos de abatedouro de aves e florestais em energia para aquecimento de água de forma sustentável. A pesquisa utilizou a biomassa da planta *Arundo donax*

(Canavieira) e o lodo de abatedouro de aves seco para criar *pellets* destinados ao aquecimento da caldeira. Por meio de uma prensa industrial, o lodo e a palha de canavieira foram transformados em *pellets*, usando três tratamentos diferentes: i) 100% de lodo: 0% de canavieira, ii) 50% de lodo: 50% de canavieira, iii) 0% de lodo: 100% de canavieira. Os *pellets* obtidos a partir dessas misturas apresentaram poder calorífico, densidade aparente e densidade energética variando entre 16,81-28,78 MJ.kg⁻¹, 646-779 kg.m⁻³ e 10,86-22,71 GJ.m⁻³, respectivamente. A análise das imagens de combustão revelou que os *pellets* provenientes da combinação de resíduos exibiram chamas mais vigorosas e uma intensidade de cor vermelha superior. Com base nos resultados, cerca de 58% do carvão de combustível fóssil usualmente utilizado para aquecer água poderia ser substituído diariamente por *pellets* renováveis provenientes da mistura de lodo e canavieira.

De acordo com os estudos apresentados, a utilização de lodo em processos de geração de energia térmica mostra-se uma prática promissora, embora apresente desafios e considerações importantes. Os estudos analisados evidenciam que o tratamento físico-químico de águas residuais da indústria de carnes, utilizando agentes coagulantes como sulfato férrico, pode resultar na produção de lodo com alto teor de matéria orgânica. No entanto, a composição do lodo, influenciada pelo tipo de coagulante utilizado, pode afetar tanto o potencial calorífico quanto as emissões gasosas durante a combustão. Além disso, a combinação do lodo com outras biomassas, como lenha ou serragem, demonstra ser uma estratégia eficaz para melhorar o desempenho do processo, aumentando a eficiência energética do equipamento e reduzindo o consumo de combustíveis fósseis. No entanto, é crucial considerar de forma atenciosa a proporção de lodo na mistura, a fim de evitar o aumento das emissões gasosas acima dos limites regulamentares e o acúmulo excessivo de cinzas na caldeira. Apesar dos desafios relacionados às emissões gasosas e à formação de cinzas, os estudos também ressaltam o potencial do lodo como uma fonte alternativa e renovável de energia.

Mantovan *et al.* (2022) estudaram a utilização do lodo flotado misturado com cavacos de madeira de eucalipto em uma caldeira para geração de vapor, considerando proporções de co-combustão de lodo flotado de até 20%. Para isso, os autores realizaram testes de campo em um gerador de vapor com capacidade nominal de 40 ton/h de vapor saturado a 15 bar. Os resultados mostraram que a eficiência aumentou com a adição de até 15% de lodo, devido à redução das perdas de energia

nos gases de combustão e menores emissões de CO. No entanto, a eficiência caiu ligeiramente com 20% de lodo, devido ao aumento das perdas de energia e à dificuldade de manter a alimentação constante de lodo flotado.

2.5 PELETIZAÇÃO DE BIOMASSA

As desvantagens da biomassa como combustível alternativo ao carvão, petróleo ou gás são atribuídas principalmente à sua baixa densidade de energia, alto teor de umidade e falta de homogeneidade. Esses problemas podem ser reduzidos ou mesmo evitados pelo uso de *pellets* de qualidade, ou seja, com baixo teor de umidade, alta densidade de energia, tamanho e forma uniformes. A qualidade consistente do combustível torna os *pellets* um tipo de combustível adequado para todas as aplicações, desde fogões e sistemas de aquecimento central até grandes usinas de energia (Thek; Obernberger, 2012).

Pellet é normalmente uma pequena massa de formato esférico ou cilíndrico, feita principalmente de material comprimido. Normalmente, a palavra é usada no plural, devido aos *pellets* não serem usados singularmente, mas como uma massa de material. Diversos produtos e materiais podem ser peletizados para serem usados termicamente como combustível ou ainda como material, como por exemplo, *pellets* para utilização energética, os quais podem ser feitos de madeira, turfa ou biomassa (Thek; Obernberger, 2012).

O processo de peletização consiste em várias etapas, incluindo pré-tratamento da matérias-primas, peletização e pós-tratamento (FIGURA 7). As etapas de pré-tratamento dependem em grande parte das propriedades da matéria-prima e normalmente incluem redução de tamanho, secagem e condicionamento. Após a peletização, os *pellets* são transferidos para um resfriador de *pellets* e peneirados para remover pequenas partículas (Quenó *et al.*, 2019).

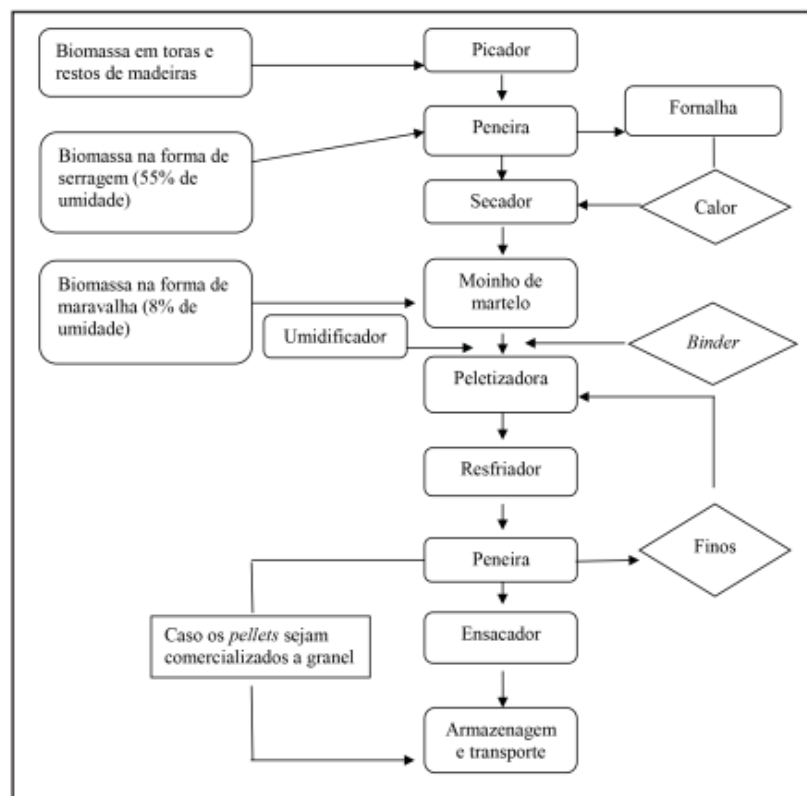
FIGURA 7 - ETAPAS GERAIS DO PROCESSO DE PELETIZAÇÃO



FONTE: A Autora (2024)

De maneira mais específica, o processo de peletização é composto por oito etapas, sendo elas: armazenamento, limpeza, secagem, moagem, peletização, resfriamento, peneiração e distribuição (FIGURA 8) (Quéno *et al.*, 2019).

FIGURA 8 - FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DO PROCESSO DE PELETIZAÇÃO

FONTE: Quéno *et al.* (2019).

A matéria-prima bruta é recebida e direcionada para o processo de trituração, onde é picada em pequenos pedaços (picador). No entanto, a serragem ou o pó de

maravalha são inseridos diretamente na etapa de homogeneização, que ocorre por meio de uma peneira, em função de suas características. Um parâmetro crucial para a produção de *pellets* é o teor de umidade do material, o valor máximo permitido na entrada do moinho é de 12-13%, para atingir esse valor, o secador utiliza o ar quente proveniente da fornalha, a qual utiliza como combustível o material separado na peneira. Em seguida, a matéria-prima é direcionada para a fase de moagem, na qual o seu tamanho é reduzido e uniformizado. Posteriormente, ocorre a classificação das partículas, aquelas que não estão adequadas são enviadas novamente para o processo de trituração, enquanto as adequadas são destinadas à peletizadora. Na peletizadora, o material é acondicionado de forma contínua e uniforme, utilizando-se vapor (Oliveira, 2014).

Na peletizadora, a compactação pode ser realizada de duas maneiras: na matriz do tipo cilíndrica vertical, o material é alimentado dentro de uma câmara entre a matriz e os rolos, por conta disso, a força dos rolos de pressão distribuem e esmagam o material pelas perfurações, de modo que o diâmetro interno da matriz seja percorrido no sentido contrário à rotação; na matriz do tipo plana (disco), a compressão ocorre em uma matriz plana e redonda com rolos de pressão sobre a superfície, em alguns modelos a matriz se mantém parada e os rolos se movem, enquanto outros modelos a matriz gira e os rolos permanecem fixos (Loução, 2008).

O processo resfriamento caracteriza-se em uma câmara vertical, por onde os *pellets* passam em fluxo contracorrente com ar, implicando na redução de sua temperatura. Após, ocorre a remoção dos finos presentes e a pesagem dos *pellets*. Por fim, é realizada a confecção em saco específicos para posterior transporte e/ou armazenamento (Loução, 2008).

Em um estudo realizado por García *et al.* (2019) sobre a produção de *pellets* de qualidade industrial a partir de serragem de pinus e misturas de biomassa residual alternativa, foram avaliados os efeitos da temperatura de peletização e do teor de umidade da biomassa na qualidade dos *pellets* produzidos. O desempenho da peletização foi avaliado com base na durabilidade, densidade aparente, teor de umidade, PCI, densidade energética, diâmetro, comprimento e densidade dos *pellets*. O efeito da temperatura de peletização ($T = 50\text{--}80\text{ }^{\circ}\text{C}$) e do teor de umidade da biomassa ($MC = 14\text{--}20\%$) na qualidade dos *pellets* foi estudado usando a metodologia de superfície de resposta (RSM). A partir da análise RSM, obteve-se um valor máximo de durabilidade de 99,4% em $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $MC = 16,6\%$. Nestas condições, todos os

parâmetros apresentaram valores dentro da faixa exigida de qualidades industriais de *pellets*. Portanto, os resultados obtidos pelos autores indicaram que tanto a temperatura de peletização quanto o teor de umidade da biomassa desempenharam um papel significativo na determinação da qualidade dos *pellets* fabricados. Assim, de acordo com García *et al.* (2019), foi evidenciado que tanto o processo de peletização quanto as características das matérias-primas podem ter impactos tanto positivos quanto negativos na qualidade do combustível sólido produzido.

2.5.1 Normas para parametrização de *pellets*

Existem vários padrões de qualidade do *pellet* dependendo do país onde o combustível sólido é produzido. Vários países estabeleceram normas nacionais para garantir aos consumidores padrões de qualidade e segurança no uso de *pellets* para aquecimento residencial, como a Suécia (SS 187.1200) e a Áustria (ÖNORM M 7135), desde 1990, e a Alemanha (DIN 51731), desde 1996. Esses países já possuem importantes cadeias tradicionais da indústria madeireira, valorizam a produção florestal nacional e passaram a produzir *pellets* para atender às necessidades energéticas do mercado local (Nunes *et al.*, 2014).

Com o crescimento do comércio internacional, surgiu a necessidade de uma norma adequada a nível europeu, que seja aceita por todos os participantes da cadeia produtiva e comercial. Nesse sentido, destaca-se a norma EN 14961, que define um conjunto de requisitos de qualidade do *pellet*, e o sistema de certificação ENplus, que garante o cumprimento dos controles de qualidade pré-definidos em todo o processo produção (Junginger *et al.*, 2009; Quéno *et al.*, 2019). A norma EN 14961 é composta por seis partes, a primeira parte da EN 14961-1 fornece uma estrutura metodológica geral e clara para a classificação de biocombustíveis sólidos. O objetivo é criar uma linguagem comum para fornecedores de biomassa, clientes e fabricantes de equipamentos. Os valores medidos e definidos pelas normas são, geralmente, aqueles diretamente ligados à qualidade da combustão dos *pellets* (EUROPE PELLET COUNCIL, 2023).

A norma inclui classes de qualidade A1 e A2 que também são implementadas via EN plus. A classe A1 é a qualidade premium usada em caldeiras ou fogões domésticos. Os *pellets* A1 produzem a menor quantidade de cinzas e atendem aos mais altos requisitos. A classe A2 é usada em instalações maiores e produz mais

cinzas. Os *pellets* industriais podem ser certificados como “EN B” (EUROPE *PELLET* COUNCIL, 2023).

O ENplus tem-se difundido rapidamente desde a sua primeira implantação na Alemanha em 2010. Em 2015, já haviam produtores de *pellets* certificados ENplus em 34 países. A produção total de *pellets* ENplus é de cerca de 8 milhões de toneladas por ano (EUROPE *PELLET* COUNCIL, 2023).

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) disponibiliza, através da Norma Brasileira 17030:2022, diretrizes para a especificação de termos e definições relacionados a *pellets*, bem como os procedimentos de avaliação para *pellets* produzidos a partir de diversas matérias-primas. Esses *pellets* são destinados a usos comerciais, residenciais e industriais, seja para fins energéticos ou até mesmo como material sanitário. A norma NBR 17030 (2022) abrange uma série de métodos de ensaio, que incluem:

- a) Determinação do teor de finos;
- b) Avaliação da durabilidade mecânica dos *pellets*;
- c) Medição do diâmetro e comprimento dos *pellets*;
- d) Cálculo da densidade a granel;
- e) Análise do teor de umidade;
- f) Estimação do teor de cinzas;
- g) Avaliação dos poderes caloríficos superior, inferior e líquido (PCS, PCI e PCL);
- h) Mensuração de nitrogênio;
- i) Análise de enxofre e cloro;
- j) Verificação de arsênio, cádmio, cromo, cobre, chumbo, mercúrio, níquel e zinco.

Esses procedimentos estabelecidos na norma NBR 17030:2022 são essenciais para garantir a qualidade e conformidade dos *pellets*, abrangendo diferentes aspectos de sua composição e desempenho, conforme sua aplicação. Por sua vez, a norma NBR 17030-1 (2022) especifica os critérios para a classificação de *pellets* produzidos a partir de serragem e pinus, agrícola e de matérias-primas diversas, para aplicação comercial, residencial e industrial, destinados ao uso energético ou ainda como material sanitário (TABELA 4).

TABELA 4 - CLASSIFICAÇÃO DE *PELLETS* A PARTIR DA NORMA NBR 17013-1

Classes dos <i>Pellets</i>				
Parâmetros	Unidade	A1	A2	B
Comprimento (L) ^{a, d}	mm	3,15 a 40	3,15 a 40	3,15 a 40
Diâmetro (D) ^{b, d}	mm	6 ou 8	6 ou 8	6 ou 8
Umidade ^{(ar), d}	w-%	≤ 8	≤ 9	≤ 10
Cinzas (550 °C) ^{c, e}	w-%	≤ 0,7	≤ 1,2	≤ 2,0
Durabilidade mecânica ^{(ar), d}	w-%	≥ 98	≥ 97,5	≥ 97
Finos (< 3,25 mm) ^{(ar), d}	w-%	≤ 0,5	≤ 1	≤ 1,5
Densidade a granel ^{(ar), d}	kg.m ⁻³	600 a 750	600 a 750	550 a 750
	MJ.kg ⁻¹		≥ 18,7	
Poder Calorífico Inferior	kWh.kg ⁻¹		≥ 5,2	
	kcal.kg ⁻¹		≥ 4458	
Aditivos ^{(ar), d}	w-%	≤ 2	≤ 2	≤ 2
Nitrogênio ^{c, e}	w-%	≤ 0,3	≤ 0,5	≤ 1,0
Enxofre ^{c, e}	w-%	≤ 0,04		0,05
Cloro ^{c, e}	w-%		≤ 0,02	0,03
Arsênio ^{c, e}	mg.kg ⁻¹		≤ 1	
Cádmio ^{c, e}	mg.kg ⁻¹		≤ 0,5	
Cromo ^{c, e}	mg.kg ⁻¹		≤ 10	
Cobre ^{c, e}	mg.kg ⁻¹		≤ 10	
Chumbo ^{c, e}	mg.kg ⁻¹		≤ 10	
Mercúrio ^{c, e}	mg.kg ⁻¹		≤ 0,1	
Níquel ^{c, e}	mg.kg ⁻¹		≤ 10	
Zinco ^{c, e}	mg.kg ⁻¹		≤ 100	

^a de 40,1 mm até 45 mm, desde que não superior a 1 % da massa.

^b variação máxima permitida ± 1 mm.

^c base seca.

^d ensaios por lote conforme a ABNT NBR 17030.

^e ensaios anuais conforme a ABNT NBR 17030.

FONTE: NBR 17013-1 (2022).

2.5.2 *Pellets* na geração de energia térmica

A utilização de *pellets* na geração de energia térmica no Brasil apresenta uma série de vantagens, consolidando-os como uma alternativa energética promissora. A relação entre preço e poder calorífico dos *pellets* determina sua competitividade no

mercado, sendo que sua maior capacidade energética está diretamente relacionada à sua densidade mais elevada e menor teor de umidade (Tavares; Tavares, 2015).

Além disso, os *pellets* oferecem benefícios práticos. Permitem uma distribuição uniforme de temperatura e pressão do vapor. Sua rápida elevação de temperatura contribui para a eficiência otimizada nos processos produtivos. Além disso, a utilização de *pellets* requer menos mão de obra para carga e descarga, graças à sua padronização de tamanho, o que proporciona uma melhor utilização do espaço durante o transporte, armazenamento e acomodação em contêineres (Junginger *et al.*, 2009; Tavares; Tavares, 2015).

Outras vantagens dos *pellets* incluem o menor custo de manutenção das máquinas utilizadas na fabricação, devido ao seu processo de produção de baixo impacto e ao uso de mecanismos rotativos. Além disso, devido à sua pequena granulometria, os *pellets* oferecem uma maior eficiência de combustão, resultando em uma liberação mais completa e controlada de energia térmica (Tavares; Tavares, 2015). Demais vantagens identificadas incluem (Garcia *et al.*, 2013):

- Neutralidade de carbono, pois o CO₂ emitido durante a queima é compensado pelo crescimento das árvores;
- Emissão reduzida de fumaça;
- Utilização de resíduos de outras indústrias, como a indústria de móveis, o que torna a matéria-prima acessível e estável;
- Densidade energética até 4,32 vezes maior do que a serragem e 3,41 vezes maior do que o cavaco de madeira;
- Redução nos custos de transporte;
- Simplificação da logística de manuseio;
- Adaptação fácil e econômica em caldeiras existentes que utilizam combustíveis fósseis para o uso de *pellets* de biocombustíveis;
- Aumento da eficiência térmica em comparação com a queima direta de biomassa.

Esses fatores tornam os *pellets* uma opção viável e atrativa para a geração de energia térmica, impulsionando sua adoção em diversos setores. Com sua capacidade energética concentrada, padronização de tamanho e baixo impacto ambiental, os *pellets* representam uma solução eficiente e sustentável para atender às demandas energéticas do país (Jacinto *et al.*, 2017).

Os *pellets* são comumente produzidos a partir de resíduos de madeira e materiais agrícolas, conhecidos por seu alto poder calorífico e baixo conteúdo mineral. Recentemente, a ênfase na produção de *pellets* tem se voltado para o aproveitamento de resíduos agroindustriais, os quais estão abundantemente disponíveis em grandes volumes. Isso, historicamente, apresentava desafios relacionados à contaminação ambiental. Adicionalmente, na maioria dos casos, esses resíduos eram subutilizados e não convertidos em produtos de maior valor. Por essa razão, a produção de *pellets* a partir de resíduos agroindustriais tem atraído crescente atenção da comunidade científica, abrindo caminho para a consideração do uso desses resíduos como biocombustível em conjunto com resíduos de madeira, como forma de compensar a carência intrínseca de potencial energético dos mesmos (García *et al.*, 2019; Sukarta *et al.*, 2018).

No estudo realizado por Brand *et al.*, (2021) acerca do impacto das misturas de biomassa na qualidade dos *pellets*, foram produzidos *pellets* a partir de diversas combinações de resíduos provenientes da cadeia produtiva do arroz e de aparas de *Pinus* spp.. Por meio de análises físico-químicas e energéticas, observou-se que os tratamentos que incluíam palha de arroz em sua composição, apresentaram menores teores de carbono fixo (CF). Já o tratamento que era composto exclusivamente por aparas de *Pinus* spp., resultou na obtenção de *pellets* com os maiores teores de carbono fixo, seguido por os demais tratamentos que também continham pinho em sua composição. O poder calorífico superior (PCS) foi maior nos *pellets* contendo 100% de aparas de *Pinus* spp.. Os *pellets* produzidos apenas com resíduos de arroz apresentaram o menor PCS. Isso relaciona-se com o fato de que os tratamentos com maior quantidade de aparas de *Pinus* spp. nos *blends* apresentaram os menores teores de cinzas, enquanto que as misturas que continham palha de arroz em sua composição, apresentaram teores de cinzas maiores.

No estudo de Wzorek *et al.* (2021), que avaliou *pellets* provenientes de misturas de esterco animal e biomassa lignocelulósica por meio de testes preliminares, quatro combinações com maior conteúdo de esterco animal foram selecionadas. Estas combinações incluíram: a) CAM90 - 90% de estrume de camelo e 10% de talo de algodão, b) CAM80 - 80% de estrume de camelo e 20% de talo de algodão, c) COM90 - 90% de estrume de vaca e 10% de bagaço de óleo de colza, d) COM70 - 70% de esterco de vaca e 30% de torta de óleo de colza. Os resultados obtidos revelaram que as misturas que incluíam resíduos animais apresentaram os

maiores teores de umidade, atingindo aproximadamente 50% para CAM80 e CAM90, e mais de 60% para COM90 e COM70. Destacou-se que a mistura de estrume bovino e torta de colza (CAM70) alcançou o valor mais elevado de Poder Calorífico Superior, atingindo 18 MJ.kg⁻¹. Adicionalmente, os testes realizados demonstraram que os *pellets* produzidos a partir de esterco de vaca e torta de óleo de colza (COM90 e COM70) exibiram índices de resistência à queda superior, mantendo-se acima dos 90%, em contraste com os *pellets* derivados de esterco de camelo e talo de algodão. A inclusão de resíduos agroindustriais, na proporção de 10-30%, nas misturas com esterco animal não causou alterações significativas nos parâmetros de resistência dos *pellets*.

No estudo conduzido por Souza *et al.* (2020), foram produzidos *pellets* a partir de combinações de resíduos de poda urbana e lodo de flotação. Essas misturas variaram de 0% a 25%, em incrementos de 5%. Os *pellets* fabricados apresentaram características visuais altamente satisfatórias, incluindo uniformidade, ausência de fissuras e trincas, além de uma superfície lisa. No que diz respeito à geração de partículas finas, os *pellets* que incorporaram lodo demonstraram médias inferiores em comparação com aqueles compostos apenas por resíduos de poda urbana. Os autores sugerem que esse resultado indica que a adição de lodo pode ter proporcionado uma maior resistência e coesão entre as partículas, o que, por sua vez, aprimorou as propriedades relacionadas ao manuseio, transporte e armazenamento. No entanto, no que se refere à durabilidade, os *pellets* com 20% de lodo exibiram uma baixa durabilidade. De acordo com as conclusões de Souza *et al.* (2020), essa redução na durabilidade pode ser atribuída à possível falta de uma agregação adequada entre as partículas, devido às suas características distintas. É importante destacar que a adição de lodo de flotação aos *pellets* também resultou em uma diminuição no poder calorífico, devido ao aumento do teor de cinzas causado pelo lodo.

Com base na pesquisa literária, é evidente que os *pellets* podem exibir propriedades diversas, dependendo da matéria-prima utilizada em sua produção. Portanto, ao empregar esse tipo de combustível no processo de queima, é crucial compreender suas características específicas para aprimorar a eficiência do processo.

2.6 COMBUSTÃO DE BIOMASSA

A combustão de combustíveis orgânicos é um processo exotérmico fundamentalmente utilizado para a geração de energia, seja na indústria ou em aplicações domésticas. Durante esse processo, tanto combustível quanto ar são consumidos, gerando gases de combustão e produtos sólidos, como cinzas e escórias. O objetivo primordial da queima desses combustíveis é a obtenção de gases de combustão (Paraschiv *et al.*, 2020). Nos últimos anos, diversos tipos de biomassa têm sido testados como substitutos dos combustíveis fósseis nos processos de combustão, visando obter um balanço satisfatório entre energia e emissões (Szymajda *et al.*, 2021).

No estudo realizado por Szymajda *et al.* (2021), foram analisadas as propriedades do esterco bovino para aplicação como combustíveis. O estudo revelou um conteúdo de carbono promissor, superior a 44%, e um Poder Calorífico Superior (PCS) de aproximadamente $16,5 \text{ MJ.kg}^{-1}$, indicando sua aplicação viável em sistemas de geração de calor e/ou energia. No entanto, as altas emissões de CO, SO₂, NO e HCl demandam investigações adicionais sobre seu potencial energético. O estudo realizado por Palma *et al.* (2022), que avaliou a combustão de três tipos diferentes de biomassa (Azeitona, Citrinos, Videira), revelou diferenças significativas em termos de emissões. O estudo ressalta a importância do conhecimento das características químico-físicas da biomassa utilizada, uma vez que a presença de metais que catalisam a formação de poluentes orgânicos, alto teor de cinzas, alta umidade, entre outros fatores, contribuem para condições inadequadas de combustão e, conseqüentemente, para um aumento inevitável na formação de compostos poluentes atmosféricos.

Dessa forma, a eficiência da combustão e a qualidade dos gases produzidos podem ser comprometidas por uma série de fatores. Um dos principais desafios reside na composição química variável dos combustíveis sólidos, que geralmente contêm carbono (C), oxigênio (O), hidrogênio (H), nitrogênio (N), enxofre (S), umidade (W) e cinzas (A), além de outros elementos residuais como cloro, fósforo e diversos metais formadores de cinzas por isso, há vários desafios para sua aplicação em processos de combustão (ROKNI *et al.*, 2018). A presença de enxofre é indesejada, devido ao fato de que durante a combustão pode oxidar-se, gerando poluentes como dióxido de enxofre (SO₂) e trióxido de enxofre (SO₃) (Pershagen, 1990). Esses ácidos, quando

presentes nos gases de combustão e condensados, podem levar à corrosão de estruturas metálicas, comprometendo a integridade física e a durabilidade dos equipamentos. Para solução, um dos principais objetivos é combinar os combustíveis de forma a eliminar os problemas associados aos vários elementos (Hupa *et al.*, 2017).

Para lidar com esses desafios, é essencial uma análise detalhada da composição química dos combustíveis, a qual é expressa em unidades de massa por unidade de massa de combustível. A análise elementar fornece informações cruciais sobre a presença e concentração de elementos como carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre, permitindo uma avaliação precisa das características dos combustíveis e a determinação da quantidade de ar necessária para uma combustão eficiente (Paraschiv *et al.*, 2017; Paraschiv; Paraschiv, 2019). A soma das participações de massa destacadas pela análise elementar deve satisfazer a Eq. (1) (Paraschiv *et al.*, 2020).

$$C + H + O + N + S + A + W = 100 \% \quad (1)$$

Sendo:

- C - Carbono;
- H – Hidrogênio;
- O - Oxigênio;
- N – Nitrogênio;
- S – Enxofre;
- W – Umidade;
- A – Cinzas.

Eficiências de combustão baixas podem resultar em desperdício de energia e altas emissões de poluentes, principalmente devido à inadequação na relação ar-combustível e à má mistura entre esses elementos (Sun *et al.* 2018; Sun *et al.*, 2018). Durante o processo de combustão, parte dos poluentes gerados são compostos por moléculas orgânicas e estruturas carbonáceas, enquanto outra fração está associada às emissões de ácidos inorgânicos.

A quantidade mínima de ar necessária para uma combustão completa de um combustível é conhecida como ar estequiométrico ou teórico (λ). Quando um

combustível é totalmente queimado com ar teórico, não há oxigênio não combinado nos gases de combustão (Paraschiv *et al.*, 2020). Processos de combustão com menos ar do que o teórico são considerados incompletos, enquanto aqueles com mais ar do que o teórico são classificados como quantidade de ar em excesso. A combustão incompleta pode ocorrer devido à insuficiência de oxigênio, mesmo na presença de excesso de ar, quando a mistura com o combustível é inadequada (Rokni *et al.*, 2018). Devido às limitações dos queimadores e fornos, é comum utilizar mais ar do que o necessário em processos reais de combustão para garantir a combustão completa ou controlar a temperatura da câmara de combustão. Isso é conhecido como combustão com excesso de ar (Paraschiv *et al.*, 2020). Durante a combustão, novas substâncias químicas, denominadas gases de combustão, são formadas pela combinação do combustível com o oxidante (Ionita, 1990). Dependendo do coeficiente de excesso de ar, os gases de combustão podem conter diferentes compostos (Paraschiv *et al.*, 2020):

- Para combustão incompleta ($\lambda < 1$): CO, CO₂, SO₂, H₂O, N₂;
- Para combustão teórica ou estequiométrica ($\lambda = 1$): CO₂, SO₂, H₂O, N₂;
- Para combustão excedente ($\lambda > 1$): CO₂, SO₂, H₂O, N₂, O₂.

Como observa-se há a formação da gases poluentes como subprodutos da combustão, tais como: CO, SO_x e NO_x. O monóxido de carbono (CO) é um subproduto da combustão incompleta, surgindo devido à presença de carbono no combustível, ele possui característica incolor e inodoro, representando um risco à saúde quando inalado em grandes quantidades (US EPA, 2016; Edward 1998). Óxidos de nitrogênio (NO_x) é o termo geral que designa a soma de monóxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio (NO₂), os dois componentes de nitrogênio mais emitidos em processos de combustão. Normalmente, as quantidades de NO formadas são muito maiores que as de NO₂ (Rapp *et al.*, 2016; De Carvalho Souza JR, 2003). Para os SO_x a taxa de conversão varia com o tipo de biomassa e, entre vários compostos SO_x (90% SO₂, 10% SO₃), o SO₂ é considerado o gás mais tóxico e prejudicial liberado para a atmosfera (Nussbaumer, 2003).

Durante o processo de queima, os níveis de monóxido de carbono (CO) geralmente não são muito sensíveis a mudanças na proporção entre o ar e o combustível, ao contrário de outros poluentes. Isso se deve ao fato de que mesmo misturas quase perfeitas entre ar e combustível podem gerar quantidades significativas de CO, devido às temperaturas altas presentes durante a combustão,

que podem causar a dissociação do dióxido de carbono (CO_2). Assim, as concentrações de CO podem diminuir rapidamente com o aumento da temperatura, desde que haja tempo suficiente para que o CO seja oxidado e convertido em CO_2 . No entanto, se a chama for subitamente extinta, possivelmente devido a uma superfície fria, o CO não terá a oportunidade de se oxidar completamente, como enfatizado por Rapp *et al.* (2016) e Turns (2006).

O processo de combustão envolve três mecanismos principais de formação de NO_x em fase gasosa: o mecanismo térmico de NO_x (resultante da oxidação do nitrogênio atmosférico em altas temperaturas acima de $1300\text{ }^\circ\text{C}$), o mecanismo de NO_x derivado do combustível (ocorrendo pela oxidação de compostos nitrogenados presentes no próprio combustível) e o mecanismo imediato de NO_x (originado pela reação dos radicais CH_i com o nitrogênio atmosférico na frente da chama) (García *et al.*, 2014). Embora os mecanismos térmicos e imediatos de NO_x sejam relevantes em processos de combustão de combustíveis fósseis, na queima de biomassa, a temperatura na câmara de combustão geralmente não ultrapassa $1300\text{ }^\circ\text{C}$ (oscilando entre $900\text{ }^\circ\text{C}$ e $1000\text{ }^\circ\text{C}$, com picos até $1300\text{ }^\circ\text{C}$), resultando na predominância do mecanismo derivado do combustível (Ozgen *et al.*, 2021).

O NO originário do combustível surge da conversão do nitrogênio presente no próprio combustível (RAPP *et al.*, 2016). Em linhas gerais, um composto nitrogenado primário se decompõe em radicais nitrogenados secundários (HCN, CN, NH_2 , NH e N). A quantidade de NO produzida também está relacionada ao teor de espécies nitrogenadas presentes no combustível, bem como à natureza das ligações químicas do nitrogênio, além da temperatura e do tempo de permanência dos gases de combustão em temperaturas elevadas (De Carvalho Souza JR, 2003).

No processo de combustão, o enxofre presente no combustível pode se combinar com as cinzas ou ser liberado para a atmosfera junto com os gases de escape, principalmente sob a forma de dióxido de enxofre (SO_2) e, em casos menos frequentes, trióxido de enxofre (SO_3). Durante o resfriamento dos gases de combustão em certas partes dos fornos, os SO_x se transformam em sulfatos, os quais condensam na superfície das cinzas (Kraszkievicz *et al.*, 2020). Conforme indicado por Nussbaumer (2003) entre 60% a 90% do enxofre contido na madeira e casca queimadas se combina com as cinzas. O enxofre restante presente no combustível é liberado nos gases de combustão, principalmente SO_2 (e em quantidades menores como SO_3). Portanto, nas queimas de biomassa, devido à baixa concentração de

enxofre, as emissões de SO₂ geralmente não são consideradas significativas. Problemas relacionados às emissões de enxofre tendem a surgir quando a concentração de enxofre no combustível ultrapassa 0,2% em peso (Oberberger, 2003).

Portanto, uma combustão ótima requer oxigênio e um tempo suficiente para a combustão completa de todos os elementos (Çengel *et al.*, 2011). Nesse sentido, com o objetivo de reduzir a emissão de poluentes atmosféricos, existem regulamentações que estabelecem limites máximos para a emissão de gases na atmosfera, tanto em nível nacional, estabelecidas pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), quanto em nível estadual, definidas pela Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Estado do Paraná (SEMA) (TABELA 5).

TABELA 5 - NORMAS REGULAMENTADORAS DE EMISSÕES GASOSAS

Norma	Descrição	Ano de Publicação
CONAMA – N°316/02	Procedimentos e Critérios para o Funcionamento de Sistemas de Tratamento Térmico de Resíduos	29/10/2002
CONAMA – N°382/06	Limites Máximos de Emissão de Poluentes Atmosféricos para Fontes Fixas – Processos de Geração de Calor a partir da Combustão de Derivados da Madeira	26/12/2006
SEMA – N°16/2014	Padrões de Emissão Atmosférica para Processos de Geração de Calor ou Energia Utilizando Biomassa como Combustível	15/04/2014

FONTE: A autora (2024).

A resolução N°8 do CONAMA estabelece limites para emissões de poluentes no ar (CONAMA, 1990). Para isso, tem-se a Escala de Ringelmann, que é um método visual desenvolvido para medir a densidade de fumaça emitida por fontes como chaminés industriais. Criada pelo engenheiro francês Maximilien Ringelmann em 1888, a escala utiliza cinco níveis de opacidade, variando de 0 (fumaça clara ou

ausência de fumaça) a 5 (fumaça muito densa e escura). Cada nível corresponde a uma porcentagem de cobertura de fundo branco pela fumaça, sendo uma ferramenta prática para avaliar a poluição do ar e a eficiência de combustão (Jorge *et al.*, 2019).

No estudo conduzido por Virmond *et al.* (2011), que investigou a combustão de lodo do processamento de carne e serragem, foram quantificadas emissões de CO de 93,58 mg.Nm⁻³ e 63,33 mg.Nm⁻³ para a serragem e o lodo, respectivamente. Para as emissões de NO_x, os valores foram de 241,58 mg.Nm⁻³ para a serragem e 1727,43 mg.Nm⁻³ para o lodo. Isso ressalta o impacto da composição da biomassa nas emissões resultantes de sua combustão, com especial atenção aos teores de nitrogênio (N). As emissões de NO_x, expressas como NO₂, na serragem estavam abaixo de todos os limites regulamentares, enquanto na combustão de lodo, foram cerca de 615% mais elevadas do que na serragem, destacando o impacto do maior teor de N do combustível na emissão de NO_x. Por fim, as emissões de CO para os combustíveis estudados estavam abaixo dos limites estabelecidos nas regulamentações brasileiras.

De Sena *et al.* (2008) ao realizar a co-combustão de lodo e serragem numa proporção de 75% em massa, registrou emissões de 636,89 mg.Nm⁻³ de NO_x, 102,57 mg.Nm⁻³ de CO e 119,56 mg.Nm⁻³ de SO_x. O teste de combustão da mistura foi satisfatório, como indicado pelos baixos teores de CO nos gases de combustão, ficando abaixo das exigências do CONAMA. Durante o processo de combustão, o enxofre presente nos combustíveis foi convertido em SO₂, com emissões dentro dos limites da CONAMA e associadas principalmente à combustão do lodo, visto que não se espera nenhum teor de enxofre na serragem, de acordo com sua composição. As emissões de NO_x da mistura foram ligeiramente altas em comparação com o limite brasileiro, devido à presença de uma quantidade significativa de nitrogênio no biocombustível e à alta temperatura de combustão (342°C). Os autores ainda afirmam que as emissões acima dos limites regulatórios também podem ser atribuídas a variações nas condições de combustão.

No estudo conduzido por Pio *et al.* (2020), foi investigada a co-combustão de biomassa florestal residual de eucalipto junto com diferentes proporções de lodo primário e secundário da indústria de celulose e papel, com uma adição máxima de até 10%, em um reator de leito fluidizado borbulhante em escala piloto. As emissões de CO permaneceram abaixo do limite regulatório de 500 mg.Nm⁻³, conforme estabelecido pelo país de origem do estudo, exceto em alguns casos, atribuídos pelas

flutuações na alimentação do combustível, conforme justificado pelos autores. Contudo, em relação às emissões de NO_x , foi observado em determinadas situações que a inclusão de lodo secundário resultou em um aumento na concentração de NO_x nos gases de combustão. A análise destacou a influência direta do teor de nitrogênio na biomassa sobre a concentração de NO_x nos gases de combustão. Os valores de concentração de NO_x variaram entre 215 mg.Nm^{-3} e 433 mg.Nm^{-3} .

Em um estudo conduzido por Lee *et al.* (2022), investigaram-se as características da queima simultânea de cavacos de madeira e resíduos de substratos de cogumelos em uma caldeira industrial. Durante a combustão exclusiva de cavacos de madeira, foram registradas emissões de CO de 112,25 ppm e de NO_x de 54,5 ppm. Por outro lado, ao queimar uma mistura de cavacos de madeira com resíduos de cogumelos (na proporção de 70/30), as emissões de CO foram de 71 ppm, enquanto as de NO_x aumentaram para 135 ppm. Ambas as combustões foram realizadas com 3 % de O_2 . Foi observado que o aumento no valor de NO_x ocorreu quando a combustão envolveu a mistura de cavacos de madeira com resíduos de cogumelos, atribuído pelos autores ao teor elevado de nitrogênio presente nos resíduos de cogumelos (2,6%), em comparação com o dos cavacos de madeira (0,3%). No entanto, ressalta-se que o aumento do NO_x pode ocorrer mesmo em condições de boa combustão.

2.6.1 Índice de incrustação e escória

Escória e incrustação são dois fenômenos, diretamente relacionados à deposição e corrosão, comumente observados durante a operação de um sistema de combustão a biomassa. O primeiro deles é produzido em zonas de alta temperatura, principalmente em grelhas ou paredes de câmaras, enquanto o segundo é típico de zonas de baixa temperatura, como as superfícies dos permutadores de calor (García *et al.*, 2015). Ambos dependem da composição química do combustível, da tecnologia de conversão utilizada e das condições de operação (Vassilev *et al.*, 2010).

Os óxidos presentes nas cinzas são uma ferramenta útil para calcular alguns índices preditivos de deposição, já que esse fenômeno geralmente é aumentado por altas concentrações de elementos de baixo ponto de fusão, como Na, K, S, Cl (sulfatos alcalinos ou cloretos) e diminuída por aqueles de alto ponto de fusão, como Ca e Mg (silicatos de cálcio ou magnésio) (Brand *et al.*, 2021; Nunes *et al.*, 2014; Pronobis,

2005; Masiá *et al.*, 2007; Yao *et al.*, 2020). Esses índices foram originalmente desenvolvidos para combustíveis fósseis, no entanto, estão sendo aplicados em estudos sobre combustíveis de biomassa (Li *et al.*, 2021; Yao *et al.*, 2020; Yao *et al.*, 2020). Geralmente, essas correlações seguem a forma B/A, onde B representa compostos com baixo ponto de fusão ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) e A representa compostos com maior ponto de fusão ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$) (Tortosa Masiá *et al.*, 2007). O valor de B/A é considerado como um índice que pode ser usado para prever o comportamento do depósito de cinzas. A presença de fósforo (P) aumenta o desenvolvimento de fases de baixo ponto de fusão nas cinzas volantes, portanto, é apropriado adicionar o conteúdo de P_2O_5 a B. Essa nova relação é denominada B/A(+P) (Masiá *et al.*, 2007). Uma relação $\text{B/A} < 0,5$ indica baixa propensão à formação de escória; $0,5 < \text{B/A} < 1,0$ indica propensão moderada à escória; $1,0 < \text{B/A} < 1,5$ indica alta propensão à escória e $\text{B/A} > 1,75$ indica uma severa propensão à escória (Nunes *et al.*, 2019). As correlações relacionadas a esses índices estão organizadas na TABELA 6 (Brand *et al.*, 2021; Garcia-Maraver *et al.*, 2017; Pronobis, 2005).

TABELA 6 - TRADICIONAIS CORRELAÇÕES DE ÍNDICES DE DEPOSIÇÃO, ESCÓRIA E INCRUSTAÇÃO

Índice	Correlação	
Deposição	$R\left(\frac{B}{A}\right) = \frac{\text{Fe}_2\text{O}_2 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2}$	(1)
Deposição _{+p}	$R\left(\left(\frac{B}{A}\right) + p\right) = \frac{\text{Fe}_2\text{O}_2 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{P}_2\text{O}_5}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2}$	(2)
Escória	$Rs = \left(\frac{B}{A}\right) \times S$	(3)
Incrustação	$Fu = \left(\frac{B}{A}\right) \times (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$	(4)

Fonte: A autora (2024).

O índice de escória (Rs) (Equação 3) é baseado na relação B/A, mas considera o teor de enxofre devido a observações relacionando biomassas contendo enxofre com a formação de depósitos enriquecidos em sulfatos alcalinos, que são instáveis em temperaturas típicas de combustão (Garcia-Maraver *et al.*, 2017).

O índice de incrustação (Fu) é baseado na relação B/A, mas também considera o teor de álcali (Na_2O e K_2O), como pode ser visto na Equação (4), logo, esses compostos alcalinos desempenham um papel importante na formação de

incrustações, uma vez que durante a combustão, eles se vaporizam e se decompõem para formar compostos eutéticos que apresentam temperaturas de fusão muito baixas e causam escória e incrustação (Garcia-Maraver *et al.*, 2017). Consequentemente, valores mais altos de Fu correspondem a maiores tendências de incrustação. Considerando esses efeitos, Fu, também foi desenvolvido estendendo o índice B/A para incluir a soma de Na₂O e K₂O (Li *et al.*, 2021).

A probabilidade de ocorrência de diferentes níveis de escória e incrustação pode ser determinada com base nos índices correspondentes, ou seja (Pronobis, 2005):

- $R_s < 0,6$: probabilidade de baixa escória;
- $0,6 < R_s < 2,0$: probabilidade de escória média;
- $2,0 < R_s < 2,6$: probabilidade de escória alta;
- $R_s > 2,6$: probabilidade de escória extremamente alta;
- $F_u \leq 0,6$: probabilidade de incrustação baixa;
- $0,6 < F_u < 40$: probabilidade de incrustação alta;
- $F_u > 40$: probabilidade de uma quantidade extremamente alta de incrustação.

Esses índices fornecem uma orientação útil para prever os níveis de escória e incrustação em diferentes contextos. Alguns estudos na literatura exploraram a aplicação das correlações em diferentes combustíveis (TABELA 7).

TABELA 7 - RESULTADOS DA LITERATURA PARA ÍNDICES DE ESCÓRIA E INCRUSTAÇÃO

Índice	B/A	B/A(+p)	R _s	F _u	R _s (+p)	F _u (+p)
Carvão ¹	0,13	0,14	0,08	0,13	0,09	0,14
Cavaco de pinus ¹	0,28	0,30	0,02	1,60	0,02	1,73
Cavaco de eucalipto	3,45	3,46	0,07	138,36	0,07	138,51
Lodo flotado de aves e peixes ²	10,97	17,98	7,68	28,14	12,64	46,30
Serragem ³	1,86	1,95	0	22,55	0	23,59
Lodo de frigorífico de carnes ³	8,26	13,76	2,81	28,08	4,68	46,78
Lodo de frigorífico de carnes ³	2,47	3,57	0	8,57	0	12,38
Serragem de pinus ⁴	3,64	-	1,20	51,60	-	-
Serragem de pinus ⁵	2,11	2,20	0,99	17,81	1,03	18,55

¹Masiá *et al.* (2007); ²Mantovan (2022); ³Virmond *et al.* (2011); ⁴Yao e Zheng *et al.* (2020); Li *et al.* (2021).

Fonte: A autora (2024).

A diversidade nos valores dos índices reflete distintos comportamentos dos materiais em relação à formação de escória e incrustação, influenciados pela composição de cada combustível e pelas características do processo. A comparação entre os valores dos índices padrão e aqueles após a adição do pentóxido de fósforo revela como a tendência à formação de escória e incrustação varia em cada material. Como destacado por Masiá *et al.* (2007), os componentes inorgânicos presentes na biomassa, como óxidos alcalinos e sais, podem agravar problemas relacionados à aglomeração, deposição e corrosão nas superfícies de transferência de calor.

A formação de escória geralmente não é observada em combustíveis com teores de cinzas inferiores a 6%, mas sim em teores superiores a 12%. No entanto, essa relação pode ser influenciada pela temperatura de fusão das cinzas, sendo que quanto menor o teor de cinzas, melhor a qualidade do combustível (Rendeiro, 2008). Portanto, a diversidade nos resultados ressalta a importância de se avaliar esses índices para a aplicação de diferentes matérias-primas e condições para compreender melhor os processos de formação de escória e incrustação.

2.7 AQUECIMENTO DE AVIÁRIOSOS

A avicultura brasileira é uma das maiores do mundo em termos de produção e exportação. Além de gerar renda, ela desempenha um papel social importante ao proporcionar oportunidades econômicas para pequenos avicultores, conhecidos como integrados, que criam frangos de corte com apoio financeiro da indústria alimentícia. Durante as primeiras semanas de vida das aves, é necessário fornecer aquecimento ao ambiente onde os pintinhos são criados, pois as temperaturas podem cair abaixo do necessário para um bom desenvolvimento dos animais. O sucesso ou fracasso da criação de frangos de corte depende das condições tecnológicas atuais desse processo (Oliveira, 2017).

Garantir o conforto térmico nas instalações avícolas é um desafio, uma vez que condições extremas de calor ou frio afetam a produção. A climatização é uma solução estratégica para criar uma situação de maior independência em relação ao clima externo, reduzindo a variabilidade na cadeia produtiva como um todo. O avicultor precisa garantir uma zona de conforto entre 31°C e 33°C para os recém-nascidos (entre um e sete dias de vida) e entre 21°C e 23°C para os animais adultos, com

umidade relativa entre 65% e 70%. Isso representa um desafio, especialmente para os avicultores da região Sul do país, especialmente durante os períodos de frio, quando é necessário aquecer o aviário para manter a temperatura adequada (Oliveira, 2017).

Nesse contexto, diversos tipos de aquecedores foram desenvolvidos para aprimorar a entrega de calor e proporcionar conforto térmico às aves com um consumo de energia mais eficiente (TABELA 8). Esses equipamentos estão em constante evolução, tornando-se cada vez mais sofisticados, funcionais e eficazes. Além dos aquecedores tradicionais, também são adotados métodos alternativos, como aquecedores que utilizam a recuperação de resíduos, sistemas de canalização de água quente no piso e tecnologia de aquecimento solar. Essas alternativas desempenham um papel crucial na busca por soluções mais sustentáveis e econômicas no fornecimento de calor para as aves (Abreu, 2021).

TABELA 8 – TIPOS E SUBTIPOS DE AQUECEDORES UTILIZADOS NA AVICULTURA

Tipos de aquecedores	Subtipos
Aquecedores a biocombustíveis sólidos	Campânulas
	Fornalhas
Aquecedores elétricos	Campânulas elétricas
	Lâmpadas infravermelhas
	Resistência embutida no piso
Aquecedores a gás	Campânulas a gás
	Campânulas de placa cerâmica
	Campânulas infravermelhas
	Geradores de ar quente

FONTE: A autora (2024).

Os aquecedores a lenha foram um dos primeiros sistemas utilizados na avicultura, caracterizando-se pelo consumo de aproximadamente 1 m³ de lenha por dia para galpões com cerca de 100 metros de comprimento. Sua operação se baseia na transferência de calor por convecção. No entanto, uma das principais desvantagens associadas a esse método é a necessidade de maior controle da temperatura, uma vez que ela tende a oscilar com facilidade devido ao processo de alimentação do combustível (Abreu, 2021).

O aumento do custo da lenha incentivou a busca por alternativas tanto em termos de combustíveis quanto de equipamentos. Sistemas que utilizam biocombustíveis, por exemplo, permitem que os produtores produzam seu próprio combustível, tornando-se uma opção cada vez mais atraente (Oliveira, 2017). Diversos estudos têm explorado o uso de biomassas residuais de diferentes origens como uma alternativa para a geração de energia, seja como complemento ou substituto aos combustíveis mais tradicionais, como lenha, cavacos, carvão ou óleo. Nesse contexto, têm sido conduzidos testes de combustão utilizando essas fontes alternativas, que incluem madeira, palha, cascas de girassol, bambu, combustível derivado de resíduos e outros resíduos para avaliar a influência no processo de geração (Turzyński *et al.*, 2022).

No estudo conduzido por Ozdemir e Demir (2021), foi analisado o potencial de combustão da cama de aviário e de biomassas disponíveis localmente com base na análise imediata, elementar, de cinzas e de gases de escape, como uma forma de recuperação de energia. Os resultados mostraram que o poder calorífico superior das amostras de cama de aviário variou entre 13,5 a 14,6 MJ.kg⁻¹, enquanto o poder calorífico inferior foi de 12,9 a 13,6 MJ.kg⁻¹. O resultado final da análise da cama de aviário foi o seguinte; C (46,5 ± 1,3%), O (44,8 ± 0,7%), H (3,6 ± 0,3%), N (3,9 ± 0,3%) e S (0,9 ± 0,1%). Minerais para depósitos de cinzas foram abundantes na cama de aviário, em contraste com a biomassa lignocelulósica; resíduo de madeira, casca de avelã, talo de milho e junco gigante, que podem servir como potencial de mitigação. As elevadas concentrações de nitrogênio e enxofre na cama de aviário aumentaram significativamente as emissões de NO_x e SO₂. De acordo com os autores, apesar das elevadas emissões de gases de escape e cinzas, as práticas de recuperação de energia da co-combustão de cama de aviário com biomassa lignocelulósicas permitem uma opção de gestão ambientalmente segura do resíduo e geração de energia alternativa.

Em um estudo realizado por Turzyński *et al.* (2022), foi realizada a caracterização de um processo de combustão utilizando misturas de esterco de galinha com serragem de madeira e palha, como o objetivo de autossuficiência térmica de uma fazenda. Os experimentos foram realizados em um reator de laboratório de pequena escala. As propriedades do esterco de galinha e os resultados experimentais indicaram dificuldade em queimar o esterco de galinha individualmente. No entanto, a adição de apenas 10% de palha/serragem de madeira melhorou

significativamente o processo de combustão, gerando aproximadamente 65 kW de energia, o que supriu a demanda térmica da fazenda (40 kW), permitindo assim a gestão de resíduos dentro de uma economia circular. Por outro lado, o uso de uma grande quantidade de palha na mistura resultou em um aumento das emissões de NO_x e temperaturas mais baixas e problemas operacionais tanto no incinerador quanto no trocador de calor, relacionados à sinterização das cinzas. Porém, proporções menores tanto de palha quanto de serragem de madeira na mistura contribuíram para a redução das emissões de NO_x, sendo essa redução ainda mais evidente com a serragem de madeira (até 280 mg.Nm⁻³). Embora as temperaturas máximas de todas as misturas tenham sido semelhantes (cerca de 1.000 °C), as temperaturas da chama aumentaram com a proporção da palha e da serragem de madeira na mistura, de 600 °C para até 800 °C (palha) e 900 °C (serragem de madeira). Esse aumento na temperatura da chama foi atribuído ao aumento na quantidade de voláteis no combustível, com o esterco de galinha contribuindo com 45% e a palha/serragem com mais de 80%, resultando em uma chama mais intensa.

Os estudos analisados oferecem uma visão abrangente e promissora sobre a utilização de biomassas residuais, seja de forma combinada ou não, no processo de combustão para geração de energia térmica. Eles destacam diversos benefícios, como a possibilidade de alcançar uma geração de energia autossuficiente, suprimindo a demanda térmica das instalações, e a capacidade de gestão de resíduos de forma eficiente, dentro de uma economia circular. Além disso, os estudos apontam para um bom desempenho do processo de combustão, mesmo em casos onde a queima individual de certas biomassas residuais se mostrou desafiadora. A combinação com biomassas lignocelulósicas se revela como uma estratégia eficaz para mitigar dificuldades operacionais e controlar as emissões de gases poluentes, como NO_x e SO_x. Ainda, a análise evidencia a possibilidade de ajustes nas proporções das misturas para otimizar o processo, reduzindo impactos ambientais adversos. Dessa forma, a utilização de biomassas residuais mostra-se como uma alternativa viável e sustentável para a geração de energia térmica, com potencial para atender às necessidades energéticas, promover a gestão ambiental responsável e contribuir para a transição para fontes de energia mais limpas e renováveis (Oliveira, 2017).

Dessa forma, independentemente do sistema e combustível utilizado, é de extrema importância garantir um bom controle do equipamento e melhorar o aproveitamento da energia liberada durante o processo de combustão. O balanço de

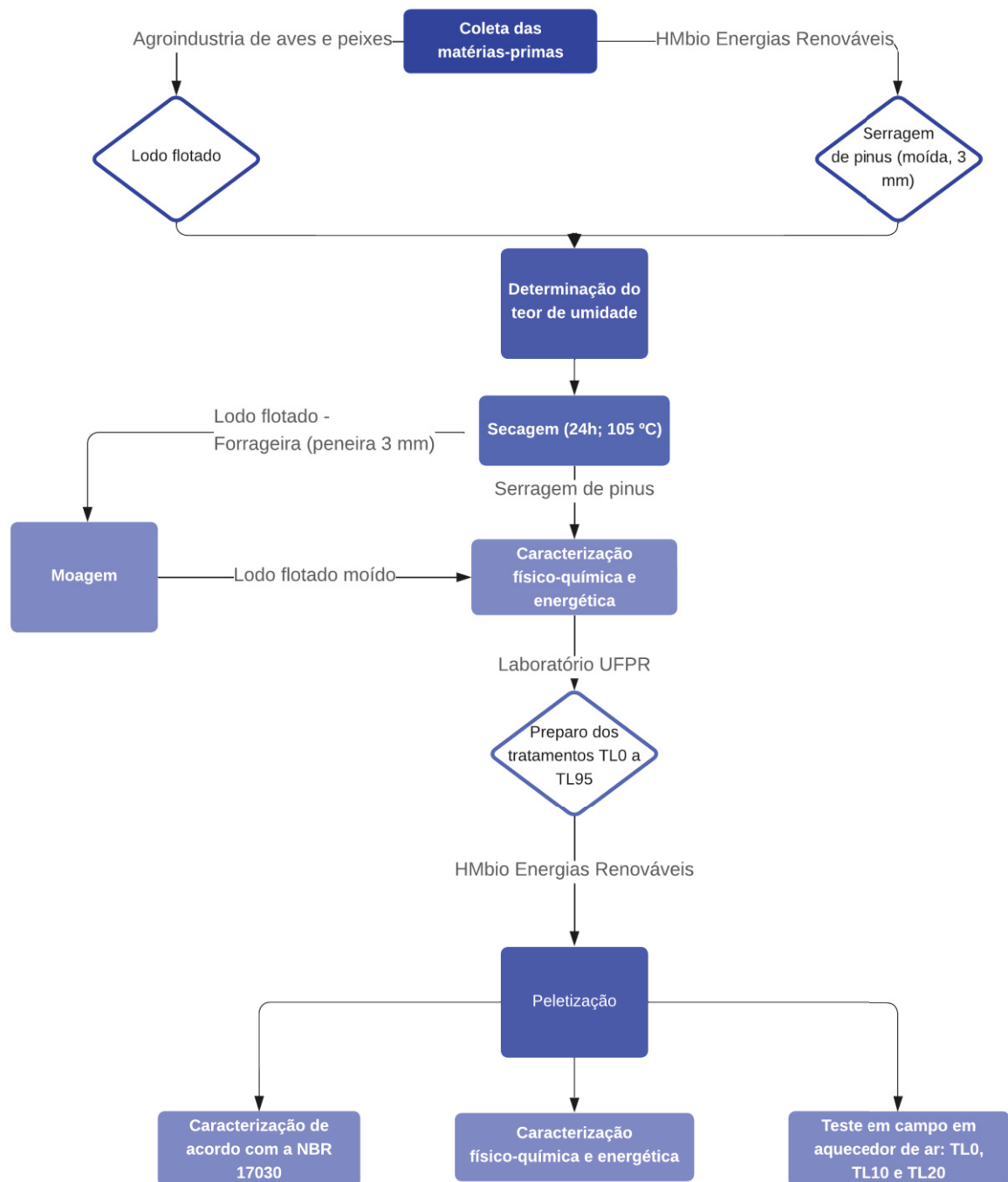
energia em uma unidade de geração permite avaliar sua eficiência, assim como a eficiência de seus principais componentes (Bazzo, 1995).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento deste trabalho consistiu na coleta das matérias-primas, lodo flotado e a serragem de pinus, que foram encaminhadas para a peletização, tendo como aglutinante o amido de mandioca, e separados em sete tratamentos (TL0, TL10, TL20, TL40, TL60, TL80 e TL95) a partir da preparação em misturas com diferentes quantidades de cada matéria-prima. Em seguida, as matérias primas e os *pellets* produzidos de cada tratamento foram submetidos a análises físico-químicas e energéticas para avaliar suas propriedades.

Posteriormente, os tratamentos TL0, TL10 e TL20, que foram produzidos em larga escala, foram submetidos a testes em campo em aquecedor de ar para avaliar a eficiência térmica e as emissões gasosas do equipamento (Agrobona AB 4000 Hib) durante a combustão. As etapas do estudo estão descritas no fluxograma conforme a FIGURA 9.

FIGURA 9 - FLUXOGRAMA REPRESENTATIVO DAS ETAPAS DO PRESENTE ESTUDO



FONTE: A autora (2024).

3.1 COLETA E PREPARO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

A coleta do lodo flotado ocorreu na fase de tratamento de efluentes (ETE) de uma agroindústria de aves e peixes localizada na região oeste do estado do Paraná,

Brasil, após a etapa de separação do efluente no tridecanter: efluente clarificado, lodo flotado e óleo ácido.

Para a produção de três tratamentos de *pellets* em larga escala (TL0, TL10 e TL20), devido à grande quantidade de material, a amostra de lodo flotado úmido foi transportada via caminhão para a fábrica de *pellets*, onde passou por secagem e moagem. Enquanto isso, o material coletado para a produção dos demais tratamentos foi armazenado em recipientes vedados e refrigerados até a caracterização e peletização. O material foi seco em estufa por 24h na temperatura de 105°C (± 2 °C), seguido pela moagem em um triturador forrageiro da marca Tramontina TRF25 com motor 2 HP e saída lateral com peneira de abertura de 3 mm (FIGURA 10).

FIGURA 10 - TRITURADOR FORRAGEIRO, MARCA TRAMONTINA TRF25, MOTOR 2HP E SAÍDA LATERAL, UTILIZADO PARA PREPARO DO LODO FLOTADO



Fonte: A autora (2024).

A serragem de pinus foi fornecida pela empresa HMBio Energias Renováveis, também localizada na região oeste do estado do Paraná, Brasil. A matéria-prima foi coletada na empresa e armazenada em sacos de rafia para ser submetida a caracterização e peletização.

3.2 PELETIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

Foram produzidos sete tratamentos de *pellets* a partir de misturas de diferentes quantidades de lodo flotado, serragem de pinus e amido de mandioca como aglutinante, conforme apresentado na TABELA 9.

TABELA 9 - COMPOSIÇÃO DOS TRATAMENTOS PRODUZIDOS

Tipo	Lodo Flotado (%)	Serragem de pinus (%)	Amido de mandioca (%)	Massa total (kg)
TL0 (0 % lodo)	0	95	5	1500
TL10 (10 % lodo)	10	85	5	1340
TL20 (20 % lodo)	20	75	5	1800
TL40 (40 % lodo)	40	55	5	30
TL60 (60 % lodo)	60	35	5	30
TL80 (80 % lodo)	80	15	5	30
TL95 (95 % lodo)	95	0	5	30

FONTE: A autora (2024).

Os tratamentos de TL0 a TL10 foram produzidos em larga escala para atender às necessidades do equipamento utilizado nos testes em campo aplicados posteriormente.

A preparação das misturas dos tratamentos de TL40, TL50, TL80 e TL95 foram realizadas no Laboratório de Química Orgânica da Universidade Federal do Paraná, Setor Palotina. Foi pesado cada componente e combinando-os em um recipiente de 20 litros. Depois, foram misturadas usando um bastão de madeira para garantir uma distribuição homogênea (FIGURA 11). Posteriormente, foram colocadas em sacos plásticos, identificadas e armazenadas para serem enviadas para a peletização.

FIGURA 11 – PREPARO DAS MISTURAS



FONTE: A autora (2024).

As misturas produzidas foram destinadas à empresa HMBio Energias Renováveis, onde, juntamente com o material enviado anteriormente, foi realizado o procedimento de peletização em uma prensa peletizadora JNMX 630 (FIGURA 12), sendo a matriz de peletização com orifícios de abertura de 6 mm.

FIGURA 12 - MATRIZ PELETIZADORA JNMX 630 DA EMPRESA HMBIO



FONTE: A autora (2024).

3.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E ENERGÉTICA

3.3.1 Caracterização das matérias-primas

As análises físico-químicas e energéticas das matérias-primas e dos *pellets* produzidos foram realizadas nos Laboratórios de Química Orgânica e de Análise Instrumental da Universidade Federal do Paraná, Setor Palotina.

Para determinação da umidade dos materiais coletados foram utilizadas as normativas NBR 9898 (ABNT, 1987) e ASTM E-871- 82, ou seja, em um béquer de 100 mL, previamente pesado, foi transferido aproximadamente 2 g de cada material. Posteriormente o béquer com amostra foi direcionado a estufa, por um período de 24 horas a temperatura de 105 °C. O teor de umidade de cada amostra coletada foi obtido pela Equação 5.

$$W(\%) = \frac{M_i - M_s}{M_s} \times 100 \quad (5)$$

Em que,

W corresponde ao teor de umidade, em base seca (kg.kg⁻¹);

M_i é a massa inicial (kg);

M_s é a massa seca (kg).

O perfil granulométrico da serragem de pinus e do lodo flotado foi determinado pesando-se aproximadamente 100 g da amostra e colocado na parte superior de um jogo de peneiras de malha, com aberturas de 10 *mesh* (2 mm), 18 *mesh* (1 mm), 20 *mesh* (0,850 mm), 35 *mesh* (0,500 mm), 60 *mesh* (0,250 mm), 100 *mesh* (0,150 mm) e o que passou pela malha de 100 *mesh* (FIGURA 13). O material no interior do jogo de peneiras foi agitado cerca de 20 minutos em um agitador de peneiras BERTEL. O material residual em cada peneira foi pesado e então foi definido o perfil granulométrico da amostra.

FIGURA 13 - ORGANIZAÇÃO DAS PENEIRAS PARA REALIZAÇÃO DA ANÁLISE DE PERFIL GRANULOMÉTRICO



FONTE: A autora (2024).

Na análise química da serragem de pinus, foram analisados em triplicata os teores de lignina, holocelulose e celulose, seguindo as normas TAPPI T 222 om-98, TAPPI T 257 om-85 e TAPPI T 257 cm-85, respectivamente.

Para a realização da análise imediata das matérias-primas foram utilizadas como parâmetros as normas organizadas na TABELA 10. Durante a análise foram determinados os teores de umidade (W), materiais voláteis (MV), carbono fixo (CF) e cinzas (CZ).

TABELA 10 – NORMAS UTILIZADOS PARA CARACTERIZAÇÃO IMEDIATA DAS MATÉRIAS-PRIMAS

Análise	Norma
W	ASTM E-871-82

MV	ASTM D-872-82
CZ	ASTM D-1102-84
CF	ASTM E-870-82

FONTE: A autora (2024)

Para a determinação do poder calorífico superior do lodo e da serragem de pinus foram adotados valores da literatura reportados nos estudos de Feldmann *et al.* (1988) e Mantovan (2022). Já para a determinação do poder calorífico inferior, para o lodo flotado, a partir do valor de PCS, teor de hidrogênio, dados da literatura, e da umidade, foi utilizada a Equação 6 (Bazzo, 1995), por outro lado, para a serragem de pinus foi adotado o valor também reportado no estudo de Feldmann *et al.* (1988).

$$PCI = PCS - 2440 (9H) + W \quad (6)$$

Onde,

PCI é o poder calorífico inferior (kJ.kg^{-1});

PCS é o poder calorífico superior (kJ.kg^{-1});

H é o teor de hidrogênio do combustível (kg.kg^{-1});

W é o teor de umidade do combustível (kg.kg^{-1})

3.3.2 Caracterização dos *pellets* produzidos

A caracterização dos *pellets* produzidos foi realizada de acordo com as normativas delineadas na TABELA 11. O propósito das análises é obter informações relativas às propriedades químicas, físicas e energéticas do material.

TABELA 11 - NORMAS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS *PELLETS* PRODUZIDOS

Análise	Norma
Teor de Umidade	NBR 17030 (2022)
Análise imediata	ASTM D-3.172-73 a D-3175-73
Densidade a granel	NBR 17030 (2022)
Densidade aparente	NBR 17030 (2022)
Cinzas	NBR 17030 (2022)
Teor de finos	NBR 17030 (2022)
Poder Calorífico Superior	Bazzo (1995)
Poder Calorífico Inferior	Bazzo (1995)

FONTE: A autora (2023).

Para determinar os Poderes Caloríficos Superior (PCS) e Inferior (PCI) das matérias-primas, foram utilizados valores previamente estabelecidos na literatura (Feldmann *et al.*, 1988; Mantovan, 2022), conforme indicado no tópico **Erro! Fonte de referência não encontrada..** Para calcular os PCS e PCI dos *pellets* produzidos, utilizou-se as equações 7 e 8, que considera os valores de PCS e PCI das matérias-primas, bem como a proporção de serragem e lodo flotado na mistura.

$$PCS = PCS_{\text{lodo flotado}} \times \% LF + PCS_{\text{serragem de pinus}} \times (1 - \%LF) \quad (7)$$

$$PCI = PCI_{\text{lodo flotado}} \times \% LF + PCI_{\text{serragem de pinus}} \times (1 - \%LF) \quad (8)$$

Onde:

PCI é o poder calorífico inferior (MJ.kg^{-1});

PCS é o poder calorífico superior (MJ.kg^{-1});

%LF é o teor de lodo flotado na mistura (%);

A determinação da densidade a granel foi realizada completando-se o volume de um cilindro com volume de $0,005 \text{ m}^3$ (FIGURA 14), sendo possível assim ter-se uma relação entre a massa e o volume (kg.m^{-3}) (Equação 8).

FIGURA 14 - CILINDRO UTILIZADO PARA A DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE A GRANEL DOS *PELLETS*



Fonte: A autora (2024).

$$d_{a\ granel} = \frac{m}{v} \quad (8)$$

Em que,

$d_{a\ granel}$ = densidade a granel (kg.m^{-3});

m = massa do material (kg);

V = volume do recipiente utilizado (m^3).

Por sua vez, a determinação da densidade a granel foi realizada a partir da relação entre a densidade a granel e o Poder Calorífico Inferior (Thek; Obernberger, 2012) (Equação 9).

$$DE = d_{a\ granel} \times PCI \quad (9)$$

Onde:

DE = densidade energética (MJ.m^{-3});

$d_{a\ granel}$ = densidade aparente (kg.m^{-3});

PCI = Poder Calorífico Inferior (MJ.kg^{-1}).

3.3.3 Análise termogravimétrica (TGA) das matérias-primas e dos *pellets* produzidos

Visando avaliar o comportamento de degradação térmica dos resíduos celulósicos, foi empregada a técnica de termogravimetria (TGA). As análises termogravimétricas foram realizadas para todas as matérias-primas e todas as misturas em um analisador térmico simultâneo (STA/TGA) PerkinElmer STA 6000, com faixa de aquecimento de 25 °C a 700 °C a uma razão de aquecimento de 10 °C min^{-1} em um fluxo de gás de 20 mL min^{-1} , avaliando-se em atmosfera de ar sintético.

3.4 ENSAIOS EM CAMPO EM AQUECEDOR DE AR

Com o objetivo de avaliar os efeitos da composição de diferentes *pellets* nas características da combustão, bem como as possíveis influências nas propriedades térmicas e emissões gasosas, foram conduzidos testes em campo em um aviário localizado na vila Candeia-Toledo, empregando os tratamentos TL0, TL10 e TL20 na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, pois apresentavam teores de lodo a

baixo de 20%, e estavam em conformidade com a normativa SEMA N°42 (SEMA, 2008), que estabelece o limite de 20% (m.m⁻¹) de resíduos para a queima em caldeiras.

O experimento foi desenvolvido em um aquecedor modelo Agrobona AB 4000 Hib, com capacidade de 3 MBtu.h⁻¹, possuindo dois ventilados de 5 cv com insuflação de ar quente até 115 °C (FIGURA 15). O equipamento tinha como possibilidade operar com combustíveis do tipo lenha e *pellets* e, além disso, contemplava uma recirculação do ar quente do aviário, função não empregada no presente trabalho

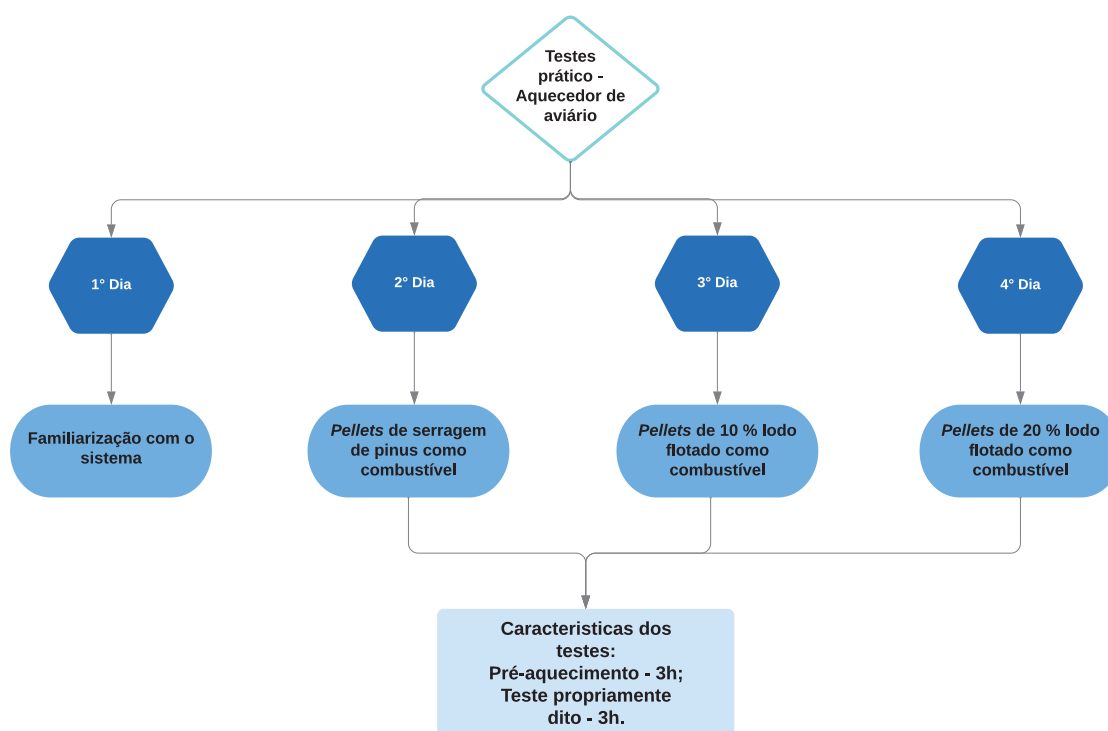
FIGURA 15 - AQUECEDOR AGROBONA AB 4000 HIB UTILIZADO EM EXPERIMENTO



FONTE: A autora (2024).

Foram realizados três testes com os tratamentos TL0, TL10 e TL20. Para cada teste foi realizado um pré-aquecimento (3 h) e o teste propriamente dito (3 h). O equipamento foi operado durante as três horas em condições fixas de alimentação de *pellets*, excesso de vazão de ar e vazão de ar insuflado no aviário. Cada teste foi realizado em um dia (FIGURA 16).

FIGURA 16 - ORGANIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS DE QUEIMA DE *PELLETS* REALIZADOS EM UM AVIÁRIO NO OESTE DO PARANÁ



FONTE: A autora (2024).

Ao longo dos testes, foram registrados dados de velocidade e temperatura do ar nos dutos de entrada e saída (FIGURA 17), utilizando o equipamento TESTO 340 equipado com tubo de Pitot, a intervalos de 30 minutos. Adicionalmente, a composição dos gases na chaminé foi analisada a cada 15 minutos por meio do equipamento TESTO 340 e sonda para amostragem de gases de combustão, sendo possível medir O_2 , CO , NO , e o SO_2 (FIGURA 18). O certificado do equipamento TESTO 340 pode ser visualizado no ANEXO I. Ao final de cada processo foi coletada parte da cinza residual para análise de carbono incombusto conforme a norma ASTM D1102 (ASTM, 2013).

FIGURA 17 - A) DUTOS DE ENTRADA E SAÍDA DE AR; B) ANÁLISE DE TEMPERATURA E VELOCIDADE NOS DUTOS DE SAÍDA DE AR QUENTE C) ANÁLISE DE VELOCIDADE E TEMPERATURA NO DUTO DE ENTRADA DE AR QUENTE.



FIGURA 18 - A) CHAMINÉ B) ANÁLISE DAS EMISSÕES GASOSAS



FONTE: A autora (2024).

3.4.1 Determinação da eficiência do aquecedor de ar

A partir dos dados coletados durante o teste em campo foi possível determinar a eficiência térmica do equipamento, por meio do *Software Engineering Equation Solver* (EES). Para isso, foi utilizada uma adaptação da norma ASME PTC 4 (ASME, 2013), uma vez que a mesma é direcionada para geradores de vapor. A norma define duas formas de cálculo de eficiência: o método direto e o método indireto. O presente estudo adotou o método indireto para determinação da eficiência do aquecedor de ar utilizado.

A determinação da eficiência com base no método indireto implica na aplicação de um balanço de energia no volume de controle que abrange o equipamento. Nesse sentido, o balanço de energia, considerando regime permanente, pode ser obtido segundo a Equação 10.

$$\dot{q}_{comb.} + \dot{q}_{créditos} = \dot{q}_u + \dot{q}_{perdas} \quad (10)$$

Onde:

$\dot{q}_{comb.}$ = é a energia associada ao Poder Calorífico Inferior do combustível (kW);

$\dot{q}_{créditos}$ = é a energia associada ao ar de combustão e ao calor sensível do combustível quando pré-aquecidos (kW);

$\dot{q}_u$ = é a energia útil gerada (kW);

$\dot{q}_{perdas}$ = é a energia perdida pelos gases de combustão, cinzas, perda para o ambiente circundante, perdas associadas ao carbono não queimado presente nas cinzas no cinzeiro e perdas relacionadas a liberação de CO (kW);

Dessa forma a equação para eficiência térmica do sistema pode ser escrita como a Equação 11.

$$\eta_{term} = 1 - \left(\frac{\dot{q}_{perdas} - \dot{q}_{créditos}}{\dot{q}_{comb}} \right) \times 100\% \quad (11)$$

Como o ar e o combustível são admitidos no volume de controle na temperatura ambiente, o termo $Q_{créditos}$ aproxima-se de zero, podendo ser desconsiderado (Bazzo, 1995). Dessa forma, a eficiência pode ser redefinida segundo a Equação 12.

$$\eta_{term} = 1 - \left(\frac{Q_{perdas}}{Q_{comb}} \right) \times 100\% \quad (12)$$

A perda de calor Q_{perdas} , é obtida de acordo com a Equação 13.

$$Q_{perdas} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 \quad (13)$$

Onde:

P_1 = é a energia perdida pelos gases de combustão;

P_2 = é energia perdida pela formação de cinzas;

P_3 = é energia perdida pelo carbono incombusto presente nas cinzas, em função de combustão parcial;

P_4 = perdas relacionadas a radiação e convecção pelas paredes do aquecedor;

P_5 = perdas relacionadas a emissão de CO;

Para a determinação de cada perda foram utilizadas as equações de 14 a 18.

$$P_1 = \dot{m}_{gás_combustão} \times h_{gás_combustão} \quad (14)$$

Onde:

$\dot{m}_{gás_combustão}$ = vazão mássica do gás de combustão (kg.s^{-1});

$h_{gás_combustão}$ = entalpia dos gases de combustão (kJ.kg^{-1}).

$$P_2 = \dot{m}_{combustível} \times h_{cinzas} \times Cz \quad (15)$$

$\dot{m}_{combustível}$ = vazão mássica do combustível (kg.s^{-1});

h_{cinzas} = entalpia das cinzas (kJ.kg^{-1});

CZ = Teor de cinzas do combustível (kg.kg^{-1}), à 1100°C ,

$$P_3 = \dot{m}_{combustível} \times PCS_c \times CZ \times C_{inc} \quad (16)$$

Onde:

$\dot{m}_{combustível}$ = vazão mássica do combustível (kg.s^{-1});

PCS_c = Poder calorífico superior do carbono incombusto (kJ.kg^{-1});

CZ = Teor de cinzas do combustível (kg.kg^{-1});

C_{inc} = Teor de carbono não queimado (kg.kg^{-1});

$$P_4 = \dot{m}_{combustível} \times PCI_{combustível} \times perda \quad (17)$$

Onde:

$\dot{m}_{combustível}$ = vazão mássica do combustível (kg.s^{-1});

$PCI_{combustível}$ = Poder calorífico inferior do combustível (kJ.kg^{-1});

Perda por radiação e convecção = $\sim 1\%$ (Bazzo, 1995).

$$P_5 = m_{gás_CO} \times PCS_{co} \times \dot{m}_{combustível} \quad (18)$$

Onde:

$\dot{m}_{combustível}$ = vazão mássica do combustível (kg.s^{-1});

PCS_{co} = Poder Calorífico Superior (kJ.kg^{-1})

$m_{gás_CO}$ = vazão mássica de gás CO ($\text{kg_CO.kg_fuel}^{-1}$);

3.5 ANÁLISE CARBONO INCOMBUSTO

O teor de carbono incombusto nas cinzas foi determinado conforme a norma ASTM D1102 (ASTM, 2013). As cinzas utilizadas na análise foram coletadas ao final de cada teste em campo. A base da análise consistiu na permanência das amostras em forno mufla a 600°C até atingirem massa constante.

3.6 TENDÊNCIA DE DEPOSIÇÃO, ESCÓRIA E INCRUSTAÇÃO

Para determinar os índices de deposição, escória e incrustação, foram empregadas as Equações 1, 2, 3 e 4 organizadas na TABELA 6. A composição química das cinzas utilizada na avaliação das tendências de deposição, escória e incrustação foi baseada em estudos da literatura. Para o lodo flotado em análise, utilizou-se os dados de Mantovan (2022), que também investigou o lodo flotado da indústria avícola/peixes, enquanto, para a serragem de pinus, as informações foram extraídas do estudo de Pelanda *et al.* (2015).

3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para a análise estatística, as variáveis analisadas foram umidade, carbono fixo, materiais voláteis e teor de cinzas (por análise imediata e pela NBR 17030), densidade aparente e a granel *pellets*, teor de finos e carbono incombusto. Os dados obtidos serão submetidos à análise de regressão ($p < 0,05$), para a seleção do melhor modelo, serão adotados os seguintes critérios de ajuste: regressão, desvios de regressão não significativos e coeficiente de determinação significativo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

A análise de perfil granulométrico da serragem de pinus e lodo flotado revelou a distribuição das partículas em diferentes faixas de tamanho, os resultados estão organizados na TABELA 12.

TABELA 12 - RESULTADOS DA ANÁLISE DE PERFIL GRANULOMÉTRICO DA SERRAGEM DE PINUS

<i>Mesh</i>	Granulometria (mm)	Distribuição Serragem de Pinus (%)	Distribuição Lodo flotado (%)
10	$\varnothing \geq 2,00$	5,61	12,03
18	$2,00 > \varnothing \geq 1,00$	21,13	42,80
20	$1,00 > \varnothing \geq 0,85$	10,90	6,51
35	$0,85 > \varnothing \geq 0,50$	32,24	15,99
60	$0,50 > \varnothing \geq 0,25$	22,28	11,20
100	$0,25 > \varnothing \geq 0,15$	6,18	5,43
Fundo	$\varnothing < 0,15$	2,79	4,49

Fonte: A autora (2024).

A concentração predominante de partículas de serragem de pinus é observada nos tamanhos de *mesh* 18 (entre 2,00 e 1,00 mm), 35 (entre 0,85 e 0,5 mm) e 60 (entre 0,5 e 0,25 mm), com o tamanho de 35 *mesh* (entre 0,85 e 0,5 mm) mostrando a maior distribuição, representando 32,24% das partículas, seguido pelo tamanho de 60 *mesh* (entre 0,5 e 0,25 mm), com 22,28%. Por outro lado, os tamanhos de 10 *mesh* (2 mm) e 100 *mesh* (entre 0,25 e 0,15 mm) exibem uma distribuição menor, representando 5,61% e 6,18% das partículas, respectivamente. No estudo conduzido por Oliveira *et al.* (2017), a análise do perfil granulométrico da biomassa proveniente do processamento industrial da madeira de Pinus sp. revelou uma distribuição heterogênea de partículas, com a maior proporção classificada no tamanho de 20 *mesh* (0,85 mm), representando 34% do total, seguido pelos tamanhos de 40 *mesh* (0,42 mm) e 60 *mesh* (0,25 mm), com 27% e 28%, respectivamente. A menor parte da biomassa residual foi retida na peneira de 100 *mesh*, com 11% de participação. No estudo realizado por O. Fernandez *et al.* (2017), a caracterização

granulométrica da serragem de pinus mostrou proporções maiores nos *mesh* 20 (0,85 mm) e 35 (0,5 mm), correspondendo a 51,10% e 19,90%, respectivamente. Em outra pesquisa conduzida por Moraes *et al.* (2019), o resíduo madeireiro de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* apresentou um perfil granulométrico composto por partículas finas, com tamanhos inferiores a 18 *mesh* (1 mm). Ao comparar os resultados deste estudo com os trabalhos da literatura, observa-se que em todos os casos a maior parte do perfil granulométrico da serragem de pinus se concentra na faixa de 20 a 60 *mesh*.

O lodo flotado apresentou uma distribuição granulométrica diferente, com uma maior proporção de partículas maiores. Cerca de 42,80% das partículas de lodo foram retidas na peneira de 18 *mesh* (entre 2,00 e 1,00 mm), o que indica uma maior presença de agregados de grande diâmetro em comparação com a serragem de pinus. Além disso, 12,03% das partículas de lodo foram retidas em 10 *mesh* ($\varnothing \geq 2,00$ mm), sugerindo que o lodo possui uma granulometria mais grossa. Esse perfil granulométrico pode influenciar negativamente a densidade dos *pellets* produzidos com lodo, resultando em uma densidade energética potencialmente menor. A menor presença de partículas finas, como as encontradas em 60 *mesh* (11,20%) e nas partículas menores que 0,15 mm (4,49%), pode afetar a coesão interna dos *pellets*, reduzindo sua resistência mecânica e, conseqüentemente, a qualidade do biocombustível.

Essas diferenças granulométricas entre a serragem de pinus e o lodo flotado sugerem que, enquanto a serragem de pinus possui uma granulometria mais adequada para a produção de *pellets* de alta qualidade, o lodo flotado pode exigir ajustes no processo de peletização, como a adição de aglutinantes ou a modificação das condições operacionais, para alcançar características físico-mecânicas e energéticas adequadas. No entanto, de forma geral, ambas as matérias-primas possuem tamanho de partícula inferior ao recomendado para produção de *pellets* de, no máximo, 4 mm, pois o tamanho das partículas na entrada da matriz peletizadora influencia na densidade do produto final (Holm-Nielsen; Ehimen, 2016).

Os resultados obtidos pelas análises imediata, química e de poder calorífico da serragem de pinus e lodo flotado estão organizados na TABELA 13 e TABELA 14, respectivamente, juntamente com o comparativo com estudos da literatura.

TABELA 13 - ANÁLISE IMEDIATA, QUÍMICA E DE PODER CALORÍFICO DA SERRAGEM DE PINUS E UM COMPARATIVO COM ESTUDADOS DA LITERATURA

Autores	Presente estudo	Chaula <i>et al.</i> (2014)	Charis <i>et al.</i> (2020)	Sh <i>et al.</i> (2020)	Chan; Tanksale (2016)	Santos <i>et al.</i> (2019)	Delucis <i>et al.</i> (2018)
Umidade (%)							
W	7,80 (±0,03)	16,44	6,50	8,31	6,12	10,40	2,94
Análise Imediata, base seca (%)							
MV	86,72 (±0,35)	81,03	79,16	79,41	74,38	82,56	81,97
CZ	0,97 (±0,13)	0,37	0,83	1,13	0,71	1,60	0,54
CF	12,31 (±0,43)	18,60	20	19,46	18,79	15,83	17,49
Análise química (%)							
Lignina	26,11 (±0,54)	-	-	-	20,77	39,24	31,21
Celulose	58,07 (±1,67)	-	-	-	33,89	30,36	
Holocelulose	65,21 (±1,05)	-	-	-	-	51,38	55,21
Análise de Poder Calorífico, base seca (MJ.kg⁻¹)							
PCS	20,97*	15,10	17,57	17,93	-	19,56	-
PCI	19,54*	-	-	-	17,64	18,27	-

*Nota: Feldmann *et al.*, (1988)

Fonte: A autora (2024)

TABELA 14 - ANÁLISE IMEDIATA E DE PODER CALORÍFICO DO LODO FLOTADO E UM COMPARATIVO COM ESTUDADOS DA LITERATURA

Autores	Presente estudo	Mantovan (2022)	Virmond <i>et al.</i> (2011)	Fagnani <i>et al.</i> (2019)	De Sena <i>et al.</i> (2008)
Origem	Indústria aves e peixes	Indústria aves e peixes	Indústria de aves e suínos	Indústria de aves e peixes	Indústria de aves e suínos
Coagulante	Cloreto férrico	Cloreto férrico	Sulfato férrico	Cloreto férrico	Cloreto férrico
Umidade (%)					
W	61,74 (±1,08)	65,02	15	62,5	70
Análise imediata, base seca (%)					

MV	87,52 ($\pm 0,04$)	92,83	85,29	82,35	85,7
CZ	5,20 ($\pm 0,07$)	7,86	12,3	9,01	5,7
CF	7,28 ($\pm 0,03$)	6,54	9,58	8,61	14,3
Poder Calorífico, base seca (MJ.kg⁻¹)					
PCS	25,32*	27,5	-	-	-
PCI	21,84	25,5	25,77	-	26,6

*Mantovan (2022); Mantovan (2022) apresenta dados de poder calorífico livre de cinzas

FONTE: A autora (2024).

Considerando os dados apresentados na TABELA 13 e TABELA 14, observa-se que os resultados deste estudo para as caracterizações da serragem de pinus e do lodo flotado são, em geral, comparáveis aos encontrados na literatura. Na TABELA 13, por exemplo, a umidade da serragem de pinus medida neste estudo foi de 7,80%, próxima ao valor de 6,50% reportado por Charis (2020) e 8,31% por Lkhagvadorj Sh (2020), mas significativamente menor que os 16,44% observados por Chaula (2014). O teor de materiais voláteis (MV) neste estudo foi de 86,72%, um pouco superior aos valores de 81,03% e 79,16% encontrados por Chaula (2014) e Charis (2020), respectivamente. O teor de cinzas (Cz) de 0,97% se alinha com os resultados da literatura, sendo ligeiramente maior que os 0,83% de Charis (2020) e menor que os 1,13% relatados por Lkhagvadorj Sh (2020). O teor de carbono fixo (CF) neste estudo foi de 12,31%, inferior aos 18,60% e 20% encontrados por Chaula (2014) e Charis (2020), respectivamente. Na TABELA 14, o lodo flotado analisado neste estudo apresentou um teor de umidade de 61,74%, muito próximo ao de 62,5% reportado por Fagnani (2017) e aos 65,02% de Mantovan (2022). O teor de materiais voláteis (MV) de 87,52% foi ligeiramente inferior aos 92,83% observados por Mantovan (2022). Já o teor de cinzas (Cz) foi de 5,20%, menor que os 7,86% de Mantovan (2022) e significativamente inferior aos 12,3% relatados por Virmond *et al.* (2011). O teor de carbono fixo (CF) de 7,28% está alinhado com os 6,54% encontrados por Mantovan (2022).

Para a serragem, as pequenas diferenças existentes nos teores de lignina, celulose e holocelulose são influenciadas por variações da genética, condições de crescimento, métodos de processamento da colheita, idade e fatores ambientais e geográficos (Acosta *et al.*, 2023; Feria *et al.*, 2011; Vidaurre *et al.*, 2011; Naik *et al.*, 2010). Já para o lodo flotado, a variação existente entre os resultados da análise imediata pode estar relacionada com as distinções entre os processos físico-químicos

adotados por cada indústria, coagulante utilizado, origem do material processado, manejo e entre outros fatores (Fagnani, 2017; Mantovan, 2022; Virmond *et al.*, 2011). Para ambos os materiais, a pequena divergência entre os valores de PCI, justifica-se com o método de determinação do parâmetro, uma vez que, no presente estudo ele foi determinado a partir de equações empíricas e, além disso, esse parâmetro varia de acordo com a composição da matéria-prima (Özyüğüran; Yaman, 2017).

Ao comparar o lodo flotado e a serragem de pinus, é evidente que o lodo flotado apresenta um teor de umidade mais elevado, como esperado devido às características do processo de tratamento físico-químico. Essa alta umidade pode impactar negativamente o processo de combustão, em função da temperatura de vaporização da água ser inferior à dos materiais voláteis, retardando assim a liberação desse componente essencial para o início eficiente da combustão (Marangwanda *et al.*, 2020). A presença elevada desses materiais voláteis está associada a um menor tempo de residência do combustível na fornalha e a uma melhor taxa de ignição (Barreto *et al.*, 2008). Além disso, nota-se que o teor de cinzas no lodo flotado é superior ao da serragem de pinus, indicando que a combinação desses materiais pode implicar em uma maior geração de resíduos inorgânicos, incrustações e escória durante o processo de combustão, sendo 6% um valor crítico (Charis *et al.*, 2020).

4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E ENERGÉTICA DOS *PELLETS* PRODUZIDOS

Na FIGURA 19, são exibidas as variações visuais nos *pellets* produzidos em função das diversas proporções de lodo flotado empregadas. Nota-se que conforme as proporções de lodo na composição dos *pellets* aumentam, houve uma diminuição na aglutinação entre a serragem e o lodo flotado. Esse fenômeno impacta diretamente na resistência mecânica do material, afetando características como densidade e teor de finos. Essas alterações podem ser confirmadas posteriormente pelos resultados das análises realizadas.

FIGURA 19 - ASPECTO DOS *PELLETS* PRODUZIDOS, TL0 A TL95

Fonte: A autora (2024).

A estimativa da composição química dos *pellets* pode ser realizada com base nas propriedades específicas das biomassas empregadas, desde que essas propriedades sejam conhecidas antes do início do processo de peletização. Contudo, é importante destacar que as propriedades físicas e mecânicas dos *pellets* não são determinadas exclusivamente pelas características químicas das biomassas, mas estão, em grande parte, vinculadas ao processo de peletização e à resposta da biomassa a esse processo, conforme evidenciado em diversos estudos, incluindo este (García *et al.*, 2019; Iftikhar *et al.*, 2019). A caracterização dos *pellets*, baseou-se em análises conforme as normativas da NBR 17030 e na realização da análise imediata, de acordo com o descrito anteriormente. Os resultados obtidos para o teor de umidade estão organizados na TABELA 15, enquanto os resultados para a caracterização imediata e de finos dos *pellets* produzidos estão expostos na TABELA 16 e na FIGURA 20.

TABELA 15 - RESULTADOS DE UMIDADE, ANÁLISE IMEDIATA, CINZAS E TEOR DE FINOS DOS PELLETS PRODUZIDOS.

Tratamento	TL0	TL10	TL20	TL40	TL40	TL80	TL95
Análise de umidade (%)							
W	8,53 (±0,51)	7,55 (±0,07)	7,17 (±0,15)	5,37 (±0,07)	4,71 (±0,11)	4,65 (±0,20)	4,87 (±0,22)

Fonte: A autora (2024).

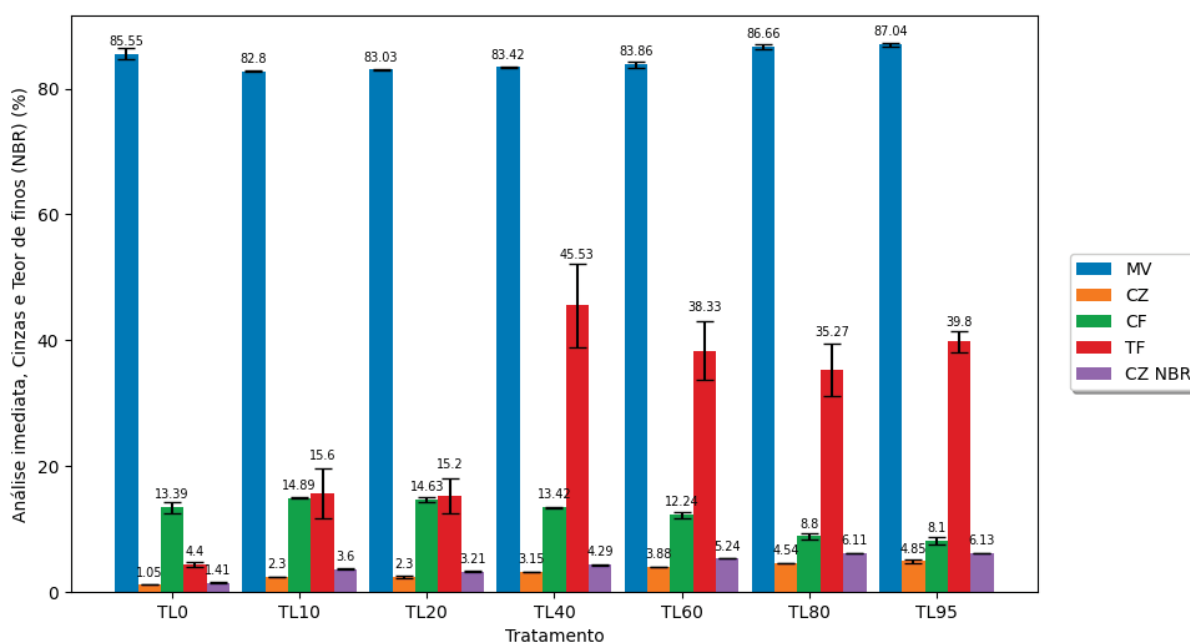
Os resultados apresentados na TABELA 15 revelam uma redução gradual no teor de umidade à medida que se progride pelos tratamentos. O tratamento TL0 apresentou o maior teor de umidade (8,53%) e o tratamento TL95 exibiu a menor umidade (4,87%). A variação observada entre os tratamentos de TL0 a TL20 e os de TL40 a TL95 pode estar associada ao armazenamento e transporte. Apesar disso, os teores de umidade se encontram dentro do limite estabelecido pela norma NBR 17013 de $\leq 10\%$.

TABELA 16 - ANÁLISE IMEDIATA, TEOR DE CINZAS E TEOR DE FINOS (NBR 17030)

	TL0	TL10	TL20	TL40	TL60	TL80	TL95
Análise imediata, base seca (%)							
MV	85,55 (±0,87)	82,80 (±0,08)	83,03 (±0,13)	83,42 (±0,13)	83,86 (±0,51)	86,66 (±0,46)	87,04 (±0,29)
CZ	1,05 (±0,01)	2,30 (±0,04)	2,33 (±0,21)	3,15 (±0,06)	3,88 (±0,03)	4,53 (±0,04)	4,85 (±0,25)
CF	13,39 (±0,88)	14,89 (±0,13)	14,64 (0,35)	13,42 (±0,09)	12,24 (0,50)	8,80 (±0,44)	8,11 (±0,54)
Análise de teor de cinzas (NBR 17030) (%)							
CZ NBR	1,41 (±0,04)	3,60 (±0,08)	3,21 (±0,02)	4,29 (±0,09)	5,34 (±0,01)	6,11 (±0,01)	6,13 (±0,004)
Análise de finos (%)							
TF	4,40 (±0,4)	15,6 (±3,94)	15,2 (±2,78)	45,53 (±6,70)	38,33 (±4,66)	35,27 (±4,17)	39,8 (±1,71)

Fonte: A autora (2024).

FIGURA 20 - RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO IMEDIATA E DE FINOS DOS *PELLETS* PRODUZIDOS.



FONTE: A autora (2024).

Ao analisar os resultados da análise imediata (TABELA 16/ FIGURA 20), observa-se que as variações nos teores de materiais voláteis entre os diferentes tratamentos foram mínimas. O aumento das proporções de lodo flotado nos tratamentos resultou em um acréscimo no teor de materiais voláteis, sendo o maior teor registrado foi no tratamento TL95. Porcentagens mais altas de voláteis são consideradas vantajosas, pois auxiliam na ignição dos *pellets*. Durante o processo de combustão, esses voláteis emitem gases como CO, CO₂, CH₄ e H₂, facilitando a ignição (De Souza *et al.*, 2020).

O teor de cinzas (CZ) é mais elevado nos tratamentos com maior quantidade de lodo flotado: TL60 (60% de lodo), TL80 (80% de lodo) e TL95 (95% de lodo), apresentando valores de 3,88%, 4,54% e 4,85%, respectivamente. Em contrapartida, o teor de carbono fixo (CF) varia, sendo TL0 e TL10 os mais altos, enquanto TL80 e TL95 são os mais baixos. Esse padrão era esperado, considerando que o lodo flotado possui proporções mais elevadas de cinzas em comparação com a serragem de pinus. Além disso, todos os tratamentos estudados, exceto TL0, ultrapassaram o limite de $\leq 2,0$ % de teor de cinzas estabelecido pela NBR 17013-1 para *pellets* de

classificação industrial, no entanto, se encontram abaixo do valor crítico de 6 % estabelecido por Charis *et al.* (2020).

No que diz respeito ao teor de finos (TF) (TABELA 16/FIGURA 20) destaca-se o tratamento TL40, que exibe um percentual elevado, sugerindo possível fragilidade no material produzido. Essa observação é relevante, uma vez que todos os *pellets* produzidos estão fora do limite máximo de teor de finos estabelecido pela norma NBR 17013-1, que é de $\leq 1,5\%$. Isso indica a necessidade de ajustes no processo/aglutinação de produção para reduzir a geração de finos e garantir a conformidade com os padrões regulatórios (Stasiak *et al.*, 2017).

TABELA 17 - DIMENSÕES DOS *PELLETS* PRODUZIDOS

Tratamento	TL0	TL10	TL20	TL40	TL60	TL80	TL95	Classificação B, industrial (NBR 17013-1)
Comprimento (mm)	10,82 ($\pm 4,45$)	9,57 ($\pm 2,93$)	10,27 ($\pm 3,81$)	10,8 ($\pm 3,70$)	9,5 ($\pm 0,29$)	8,3 ($\pm 0,28$)	7,67 ($\pm 2,72$)	3,15 - 40
Diâmetro (mm)	6,29 ($\pm 0,15$)	6,73 ($\pm 0,23$)	6,67 ($\pm 0,31$)	6,84 ($\pm 3,08$)	6,70 ($\pm 3,30$)	6,65 ($\pm 2,53$)	6,86 ($\pm 2,07$)	6 ± 1 ou 8 ± 1

FONTE: A autora (2024).

Os *pellets* analisados possuem dimensões que atendem às diretrizes estabelecidas pela norma NBR 17013-1, classificando-os como pertencentes à categoria B, indicada para utilização em equipamentos industriais (TABELA 4) (TABELA 17). Essas medidas refletem um desempenho apropriado para as aplicações industriais específicas. Conforme salientado por Liu *et al.* (2013), *pellets* com diâmetros menores, na faixa de 4 a 6 mm (± 1), favorecem uma combustão mais uniforme em comparação com *pellets* de diâmetros maiores, geralmente situados na faixa de 10 a 12 mm. No estudo realizado por Camargo *et al.* (2020) sobre *pellets* de *Pinus* spp. e *Eucalyptus* spp., foram registradas dimensões de 6,67 mm e 6,66 mm para o diâmetro, e 11,23 mm e 16,15 mm para o comprimento, respectivamente.

TABELA 18 - DENSIDADE APARENTE E A GRANEL DOS *PELLETS* PRODUZIDOS

Tratamento	TL0	TL10	TL20	TL40	TL60	TL80	TL95
------------	-----	------	------	------	------	------	------

Densidade aparente (kg.m⁻³)	1129,38 (±346,16)	1043,90 (±324,90)	1071,15 (±401,47)	854,88 (±163,64)	889,79 (±140,95)	899,73 (±105,88)	886,30 (±111,53)
Densidade a granel (kg.m⁻³)	526,66 (±3,06)	470 (±2,00)	462 (±4,00)	412 (±7,21)	400 (±5,29)	408 (±2,00)	440 (±7,21)

FONTE: A autora (2024).

Ao analisar os resultados para a densidade aparente, observa-se que o tratamento TL0, composto por 95% de serragem de pinus, apresentou a maior densidade aparente (1129,38 kg.m³), indicando uma alta massa por unidade de volume, diferenciando-se dos demais tratamentos (TABELA 18). À medida que a proporção de lodo aumenta nos tratamentos (TL10 a TL95), as densidades aparentes diminuem. Na densidade a granel, TL0 novamente se destaca com o maior valor (526,66 kg.m³), enquanto TL60 apresenta o menor valor (400 kg.m³). Os tratamentos com maiores proporções de lodo exibem densidades mais baixas, indicando uma menor massa armazenada em um determinado volume. Esses resultados podem estar relacionados às características granulométricas, estruturais e químicas do lodo, bem como ao baixo teor de umidade das matérias-primas. Considerando que o teor de umidade ideal para a peletização deve estar na faixa de 8% a 10%, umidades inferiores a essa faixa dificultam a adesão das partículas, resultando em *pellets* frágeis e quebradiços (Niedziółka, 2015). Além disso, o baixo teor de lignina nos *pellets*, à medida que aumenta a porcentagem de lodo flotado nos tratamentos, também pode ser um fator contribuinte. Um teor elevado de lignina é desejável no processo de peletização, pois aumenta a resistência e durabilidade do combustível sólido produzido. Este fato pode ser explicado pela relação entre a resistência e as forças de adesão entre as partículas que compõem os *pellets* (Zamorano *et al.*, 2011).

Ao considerar a normativa NBR 17013-1, todos os tratamentos (TL0 a TL95) estão abaixo do limite estabelecido para a densidade a granel de *pellets* classificados como B, ou seja, os valores se encontram abaixo da faixa de 550 kg.m⁻³ a 750 kg.m⁻³ (TABELA 4). Em comparação com investigações anteriores, os valores obtidos apresentam variações em relação aos resultados de De Souza *et al.* (2020) para a densidade a granel de *pellets* comerciais de *eucaliptos spp.* (612,24 kg/m³). Adicionalmente, os estudos de Masche *et al.* (2019) revelaram densidades a granel e

aparente para *pellets* de *pinus nigra* de 580,4 kg.m⁻³ e 1138,8 kg.m⁻³, respectivamente. Garcia *et al.* (2018) determinaram uma densidade aparente de 689,91 kg.m⁻³ *pellets* de *pinus spp.*, enquanto Santos *et al.* (2015) encontraram uma densidade aparente de 1364 kg.m⁻³ para *pellets* de *pinus spp.* Esses resultados indicam que TL0 a TL20 exibem densidades a granel mais elevadas, enquanto TL40 a TL95 apresentam densidades mais baixas em comparação com os dados fornecidos por esses estudos.

TABELA 19 - RESULTADOS DA DENSIDADE ENERGÉTICA E DO PODER CALORÍFICO DOS *PELLETS* PRODUZIDOS

Tratamento	TL0	TL10	TL20	TL40	TL60	TL80	TL95
Análise de densidade energética (GJ.m⁻³)							
DE	10,29	9,29	9,24	8,43	8,37	8,72	9,31
Análise de Poder Calorífico, base seca (MJ.kg⁻¹)							
PCS	20,97	21,41	21,84	22,71	23,58	24,45	25,32
PCI	19,54	19,77	20	20,46	20,92	21,38	21,84

Fonte: A autora (2024).

Os tratamentos TL40 e TL60 se destacam como aqueles com as menores densidades energéticas, 8,43 GJ.m⁻³ e 8,37 GJ.m⁻³, respectivamente. Esses resultados estão diretamente relacionados com os valores de poder calorífico inferior (PCI) e densidade a granel de cada pellet. Pode-se notar que, enquanto a densidade a granel diminui com a adição de lodo, o PCI apresenta um comportamento oposto, aumentando conforme a proporção de lodo aumenta. Por exemplo, o PCI do tratamento TL0 é 19,54 MJ.kg⁻¹, enquanto o PCI do tratamento TL95, 95% lodo, é 21,84 MJ.kg⁻¹ (TABELA 19).

Ao comparar os resultados obtidos com estudos anteriores, verifica-se que os valores de densidade energética obtidos na presente pesquisa são semelhantes àqueles relatados na literatura para combustíveis comumente utilizados. Garcia *et al.* (2013) encontrou densidades energéticas de 10,41 GJ.m⁻³ a 11,57 GJ.m⁻³ para diferentes tipos de *pellets* de madeira, enquanto Garcia (2017) relatou que a densidade energética da lenha varia de 2,2 GJ.m⁻³ a 4,2 GJ.m⁻³ e de *pellets* de madeira varia entre 10,8 GJ.m⁻³ e 15,4 GJ.m⁻³. Pereira *et al.* (2016) determinou uma densidade energética de 10,18 GJ.m⁻³ para *pellets* de eucalipto. Os resultados da presente

pesquisa, que variam de 8,37 GJ.m⁻³ a 10,29 GJ.m⁻³, estão próximos dos valores reportados em literatura.

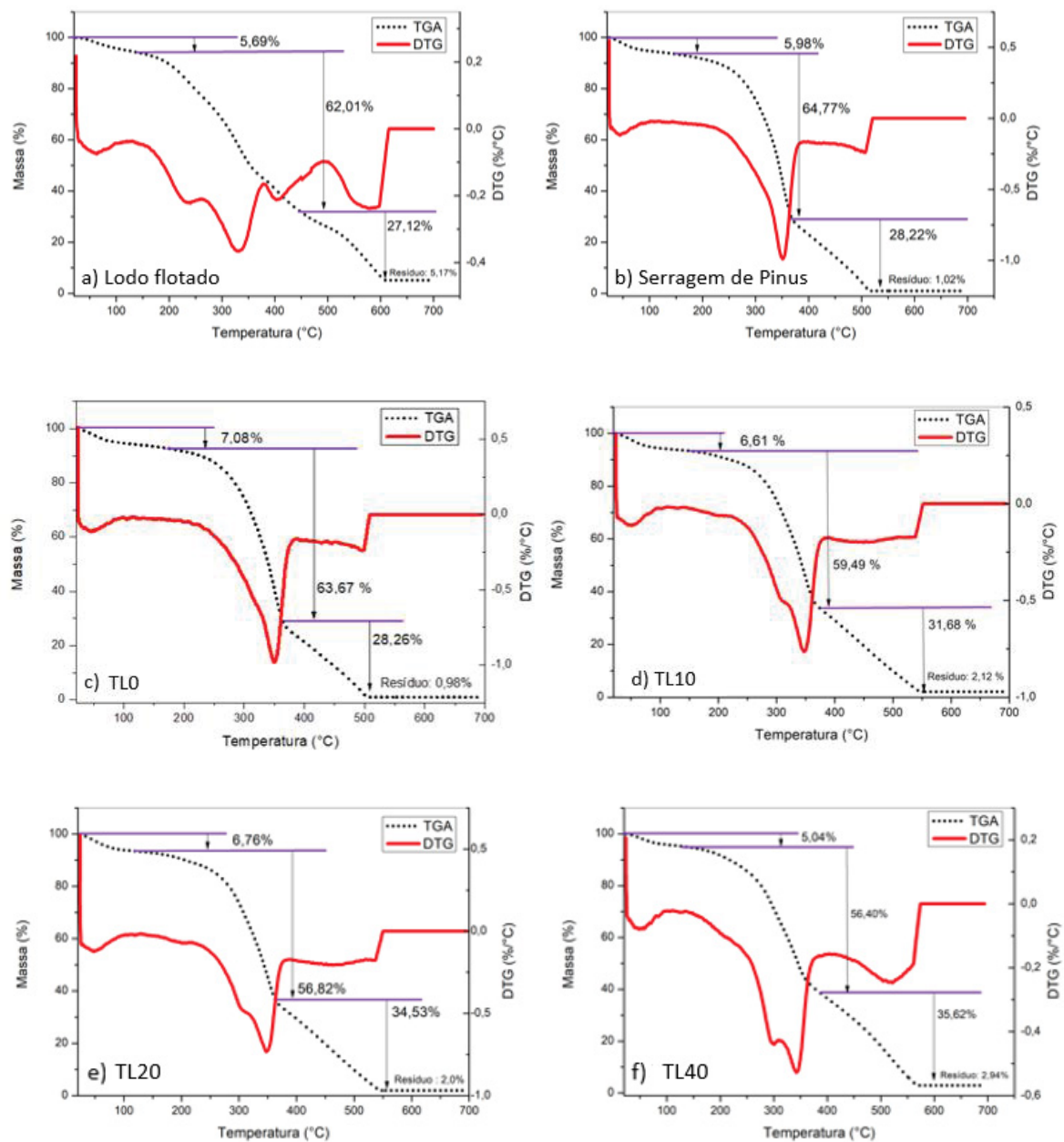
Os resultados da análise do poder calorífico inferior e superior dos *pellets* produzidos demonstraram uma tendência consistente de aumento no potencial energético à medida que a proporção de lodo na mistura é incrementada. Inicialmente, no tratamento TL0, em que apenas serragem foi utilizada, o poder calorífico inferior foi determinado em 19,54 MJ.kg⁻¹, sendo próximo à média da literatura de 17,64 MJ.kg⁻¹ (Stolarski *et al.*, 2022). Com a adição de 10% de lodo no tratamento TL10, observou-se um aumento sutil no poder calorífico inferior, alcançando 19,77 MJ.kg⁻¹. Conforme a quantidade de lodo é gradativamente incrementada nos tratamentos TL20-TL95, há um crescimento progressivo no poder calorífico inferior. Esse aumento torna-se mais notável nos tratamentos TL40-TL95, nos quais a presença de lodo em proporções maiores resultou em incrementos significativos no poder calorífico. O tratamento TL95, 95% lodo, apresentou o poder calorífico inferior mais elevado, medido em 21,84 MJ.kg⁻¹, indicando um potencial energético superior. Esses resultados sugerem que o lodo contribui positivamente para as propriedades energéticas dos *pellets*. Além disso, é importante ressaltar que todos os tratamentos excederam o limite mínimo estabelecido pela NBR 17013-1 para poder calorífico inferior de *pellets* ($\geq 18,7$ MJ.kg⁻¹), garantindo assim a conformidade com os padrões de qualidade exigidos pela norma para a classe B dos *pellets*.

O estudo sugere que a adição de lodo às misturas de *pellets* pode melhorar as propriedades energéticas dos *pellets*. No entanto, ajustes no processo são necessários para reduzir a geração de finos e garantir que a produção atenda aos padrões estabelecidos pela NBR 17013-1, lembrando que a mesma se refere a padrões de *pellets* pinus, que é considerada uma biomassa ideal. Vale ressaltar que, embora os *pellets* produzidos com a adição de lodo possam não se enquadrar perfeitamente nos critérios da NBR 17013-1, isso não indica necessariamente uma qualidade inferior. Trata-se de uma biomassa diferente que foi agregada, e as especificações podem variar de acordo com as características específicas dessa nova composição.

4.3 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA DAS MATÉRIAS-PRIMAS E DOS *PELLETS* PRODUZIDOS

A análise termogravimétrica (TGA) é importante para a definição dos parâmetros de combustão, permitindo uma melhor compreensão das temperaturas iniciais e finais de degradação dos materiais (Lubwama *et al.*, 2020). As curvas TG e DTG do lodo flotado, serragem de pinus e dos tratamentos TL0, TL10, TL20, TL40, TL60, TL80 e TL95 produzidos, obtidas sob atmosfera de ar sintético, são mostradas na FIGURA 21. A análise exibiu três eventos térmicos mais pronunciados para os materiais avaliados (TABELA 20).

FIGURA 21 – ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA): A) LODO FLOTADO; B) SERRAGEM DE PINUS; C) TL0; D) TL10; E) TL20; F) TL40; G) TL60; H) TL80; I) TL95



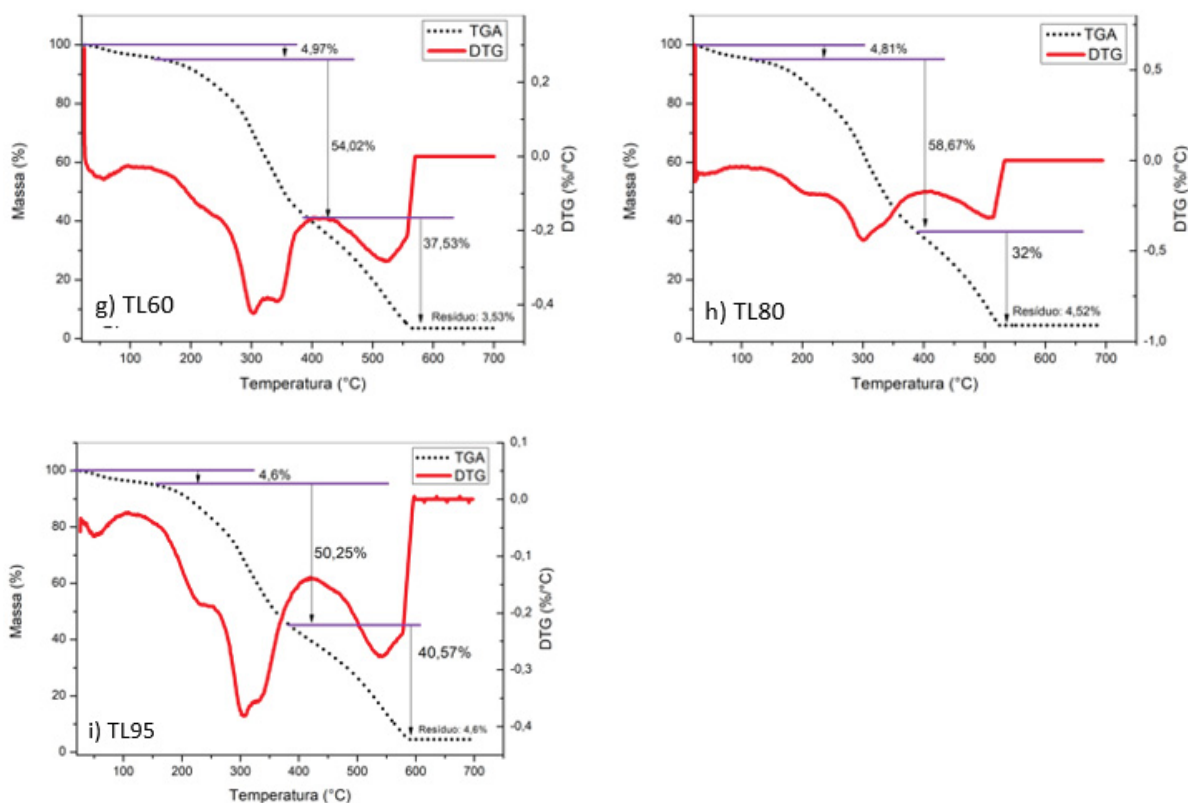


TABELA 20 - FAIXA DE TEMPERATURA DOS EVENTOS TÉRMICOS OBSERVADOS NO TGA PARA O LODO FLOTADO, SERRAGEM DE PINUS E DOS TRATAMENTOS DE TL0 A TL95

Amostra	Primeiro evento (°C)	Segundo evento (°C)	Terceiro evento (°C)
Lodo flotado	50 - 140	160 - 380	380 - 590
Serragem de Pinus	45 - 140	180 - 370	370 - 517
TL0	35 - 140	180 - 370	370 - 510
TL10	40 - 140	160 - 365	365 - 543
TL20	30 - 120	150 - 370	370 - 540
TL40	35 - 115	150 - 370	370 - 570
TL60	45 - 150	160 - 370	370 - 566
TL80	45 - 120	130 - 360	360 - 525
TL95	50 - 150	150 - 380	380 - 587

FONTE: A Autora (2024).

O primeiro evento térmico está vinculado ao processo de desidratação e remoção de componentes voláteis leves (Silva *et al.*, 2023). A perda de massa durante esse evento foi de 5,59% para o lodo flotado (FIGURA 23a), 5,98% para a serragem de pinus (FIGURA 23b) e 5,7% em média para os tratamentos (FIGURA 23c-i). O segundo evento térmico, correspondente à desvolatilização, no lodo flotado envolve a

decomposição de carboidratos e lipídios (Kunh *et al.*, 2022; Supaporn e Yeom, 2016). Para a serragem de pinus, resulta da quebra térmica de ligações fracas na estrutura polimérica dos principais componentes da biomassa, especificamente a degradação da hemicelulose e celulose, enquanto a lignina pode continuar sua decomposição até quase 800 °C (Bridgwater *et al.*, 1999; Yao *et al.*, 2017). A perda de massa nesse segundo evento foi de 62,01% para o lodo flotado e 64,77% para a serragem de pinus. A temperatura máxima de perda de massa foi de 330 °C para o lodo flotado e 351 °C para a serragem pinus. O terceiro evento térmico, relacionado à combustão do carbono fixo, foi observado na faixa de temperatura de 380-590 °C para o lodo flotado (FIGURA 23a), com uma perda de massa de 41,29% nesta faixa, associado a materiais orgânicos biodegradáveis e não biodegradáveis presentes na estrutura do lodo (Kunh *et al.*, 2022). Para a serragem, o terceiro evento térmico começa aproximadamente aos 370 °C e termina por volta dos 517 °C, com uma perda de massa de 24,46% (FIGURA 23b). Para ambos os materiais, a perda de massa relacionada ao carbono fixo pode ter ocorrido com a liberação de voláteis no terceiro evento térmico na curva DTG (Buyukada 2017; Wang et al. 2019; Espuelas et al. 2020). Como esperado, eventos térmicos similares foram observados para os tratamentos produzidos (FIGURA 23c-i), sem diferenças notáveis no processo de combustão dos materiais precursores e dos tratamentos produzidos.

Andriola (2023) realizaram a análise termogravimétrica (TGA) do lodo flotado da indústria avícola/peixe e de *pellets* com diferentes proporções de lodo flotado e capim-elefante KBS. Para o lodo flotado, observaram três eventos térmicos: o primeiro entre 90-110 °C, o segundo entre 200-250 °C e o terceiro entre 550-700 °C. Nos *pellets* produzidos, os eventos térmicos ocorreram nas faixas de 90-110 °C para o primeiro, 110-300 °C para o segundo e 390-700 °C para o terceiro. Kunh *et al.* (2022) também realizaram TGA em lodo centrifugado da indústria avícola, serragem, e briquete produzido a partir da mistura do lodo centrifugado com serragem. Foram identificados três eventos térmicos para todos os materiais. Na etapa de desidratação, a faixa de temperatura variou de 70-150 °C, com perdas de massa de 4,58% para o lodo centrifugado, 3,86% para a serragem, e 6,92% para o briquete. A desvolatilização ocorreu entre 220-450 °C, resultando em perdas de massa de 47,08% para o lodo centrifugado e 71,68% para a serragem. A última etapa, relacionada à combustão do carbono fixo, ocorreu entre 450-680 °C para o lodo, com uma perda de massa de

41,29%, enquanto para a serragem, a faixa foi de 450-600 °C, com uma perda de 24,46%.

4.4 COMBUSTÃO DE *PELLETS* EM AQUECEDOR DE AR

4.4.1 Parâmetros analisados a partir dos testes de combustão de *pellets* em aquecedor de avião

O teor de carbono incombusto nas cinzas foi de 3% ($\pm 0,001$) para TL0, 5,23% ($\pm 0,005$) para TL10 e 11,04% ($\pm 0,01$) para TL20. O teor de oxigênio nos gases de combustão variou entre 3,63% para TL0, 4,67% para TL10 e 3,65% para TL20, resultando em um excesso de ar de 20% para TL0, 29% para TL10 e 20% para TL20. Esses valores se alinham à faixa indicada para madeira, de 20 a 25%, conforme Ceron (2010). Na TABELA 21 são apresentados os dados de temperatura ambiente, velocidade nos dutos de entrada D1 e D2, temperatura nos dutos, taxa de alimentação (parâmetro do equipamento, o qual influencia diretamente na vazão de combustível para o sistema), vazão mássica do combustível e temperatura dos gases de combustão registrados ao longo dos testes de combustão dos tratamentos TL0 (95% serragem), TL10 (10% lodo) e TL20 (20% de lodo). Os dados oferecem uma compreensão das variáveis operacionais e ambientais durante o processo de queima de *pellets* nos tratamentos.

TABELA 21 – DADOS DO SISTEMA AO LONGO DOS TESTES DE COMBUSTÃO DOS TRATAMENTOS.

Tratamento	TL0	TL10	TL20
T. ambiente (°C)	29 ($\pm 1,71$)	28 ($\pm 3,7$)	31 ($\pm 3,9$)
Velocidade D1 (m.s⁻¹)	17 ($\pm 0,4$)	17 ($\pm 0,3$)	17 ($\pm 0,3$)
Velocidade D2 (m.s⁻¹)	18 ($\pm 0,26$)	18 ($\pm 0,3$)	18 ($\pm 0,4$)
T. nos dutos (°C)	91 ($\pm 2,28$)	92 ($\pm 3,1$)	101 ($\pm 2,3$)
Taxa de alimentação*	4s:15s	4s:16s	4s:16s
Vazão mássica (kg. s⁻¹)	0,01094	0,01189	0,01089
T. gases de combustão (°C)	367 (± 11)	379 (± 11)	370 (± 10)

*A taxa de alimentação refere-se ao tempo de alimentação (4s) do combustível e ao intervalo entre cada ciclo de alimentação (15/16s).

Fonte: A autora (2024).

Os resultados apresentados referem-se aos três testes de combustão com os tratamentos TL0, TL10 e TL20, realizados em um aquecedor de aviário, conforme descrito no tópico 3.4. Vale ressaltar que, TL0, são *pellets* compostos inteiramente por serragem de pinus. TL10 possui composição de 85% serragem de pinus e 10% de lodo flotado, enquanto no TL20, a proporção foi de 75% de serragem de pinus e 20% de lodo flotado. Além disso, evidencia-se que conforme aumenta-se a quantidade de lodo flotado nas proporções, houve um aumento no poder calorífico inferior dos *pellets* (TABELA 19).

Ao analisar os dados, percebe-se variações nos diferentes parâmetros medidos durante os testes. A temperatura ambiente durante os testes variou entre 28°C e 31°C, uma vez que os testes ocorreram em dias distintos, enquanto as velocidades nos dutos de alimentação (D1 e D2) permaneceram constantes em 17 m.s⁻¹ e 18 m.s⁻¹, respectivamente. Por outro lado, a temperatura nos dutos aumentou de TL0 para TL20, variando de 91°C a 101°C. Isso indica o aumento da capacidade de aquecimento do aquecedor à medida que o teor de lodo flotado nos *pellets* é elevado, corroborando com o fato de que o PCI cresce com a maior proporção de lodo flotado no tratamento. Além disso, a taxa de alimentação foi ajustada, onde para os testes os *pellets* possuíam proporções de lodo, houve uma necessidade de intervalo de alimentação ligeiramente maior (16s).

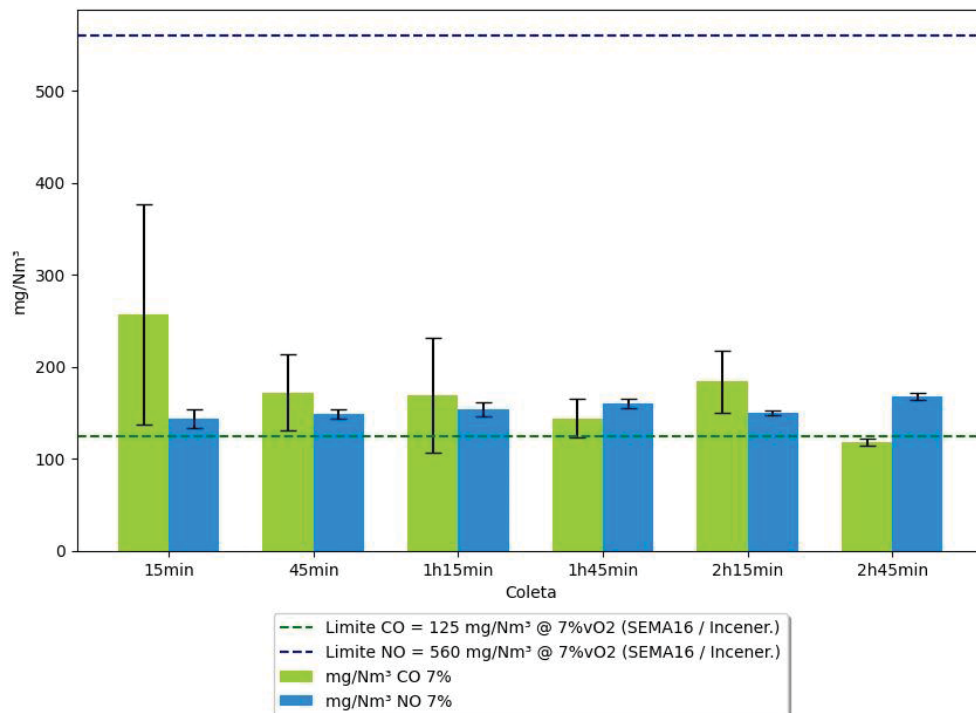
Por fim, a temperatura dos gases de combustão também foi medida, e os resultados mostraram pequenas variações entre os testes. Enquanto em TL0 registrou-se uma temperatura de 367°C, em TL10 essa temperatura aumentou para 379°C, e em TL20 houve um novo aumento, quando comparada ao TL0, chegando a 370°C. Essa variação confirma o maior potencial energético disponibilizado pelos tratamentos com maior teor de lodo flotado, resultando em uma liberação de calor mais intensa e, conseqüentemente, em temperaturas mais elevadas dos gases de combustão.

De maneira geral, os resultados dos parâmetros analisados durante os testes sugerem que a inclusão de lodo flotado na composição dos *pellets* pode aumentar o poder calorífico inferior, acarretando no aumento da temperatura do ar aquecido e um leve aumento das temperaturas dos gases na chaminé.

4.4.2 Emissões gasosas durante a combustão de *pellets* em aquecedor de aviário

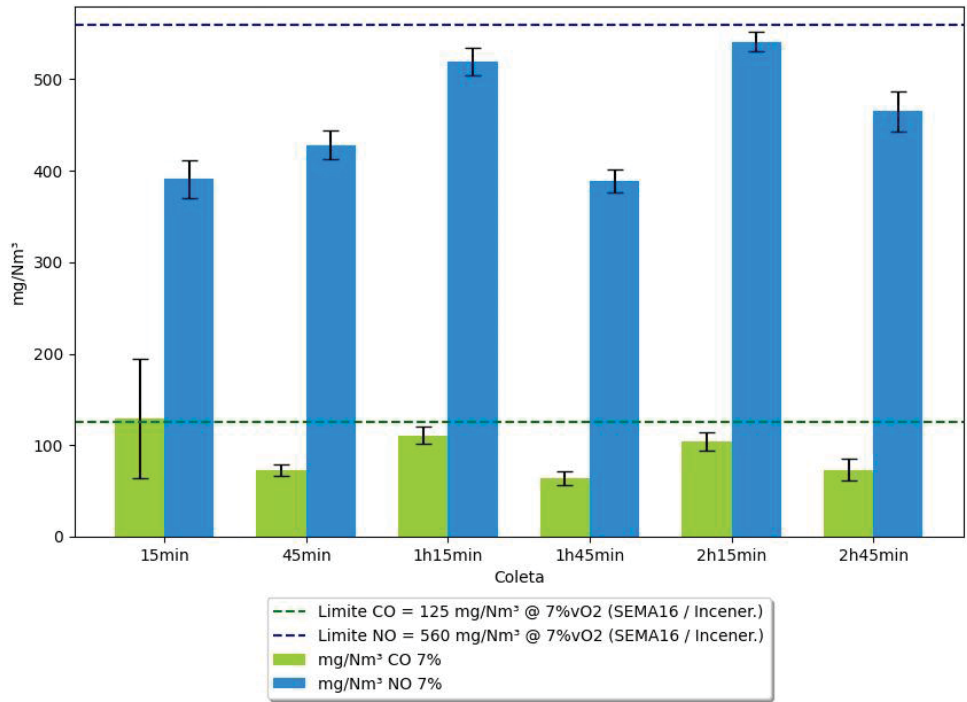
A análise das emissões gasosas durante a combustão dos tratamentos TL0, TL10 e TL20 no aquecedor de aviário foi fundamental para compreender o impacto ambiental dessa prática. Nesse contexto, a avaliação das emissões de compostos como monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x) e óxidos de enxofre (SO_x) desempenha um papel crucial. Na presente análise, foram expostas as emissões de CO e NO_x durante os testes realizados, as quais estão organizadas na FIGURA 22, FIGURA 23 e FIGURA 24, para os tratamentos TL0, TL10 e TL20, respectivamente. É importante notar que as emissões de SO_x não estão demonstradas, uma vez que as medições registraram 0 mg.Nm⁻³. A título de comparação, foram considerados os limites de emissões estabelecidos para incineração, dado que este estudo envolveu a queima de *pellets*. No entanto, é necessário que os órgãos reguladores estabeleçam limites específicos para as emissões geradas pela queima em aquecedores de aviários.

FIGURA 22 - EMISSÕES DE CO E NO_x A PARTIR DA COMBUSTÃO DO TRATAMENTO TL0, 95% SERRAGEM DE PINUS.



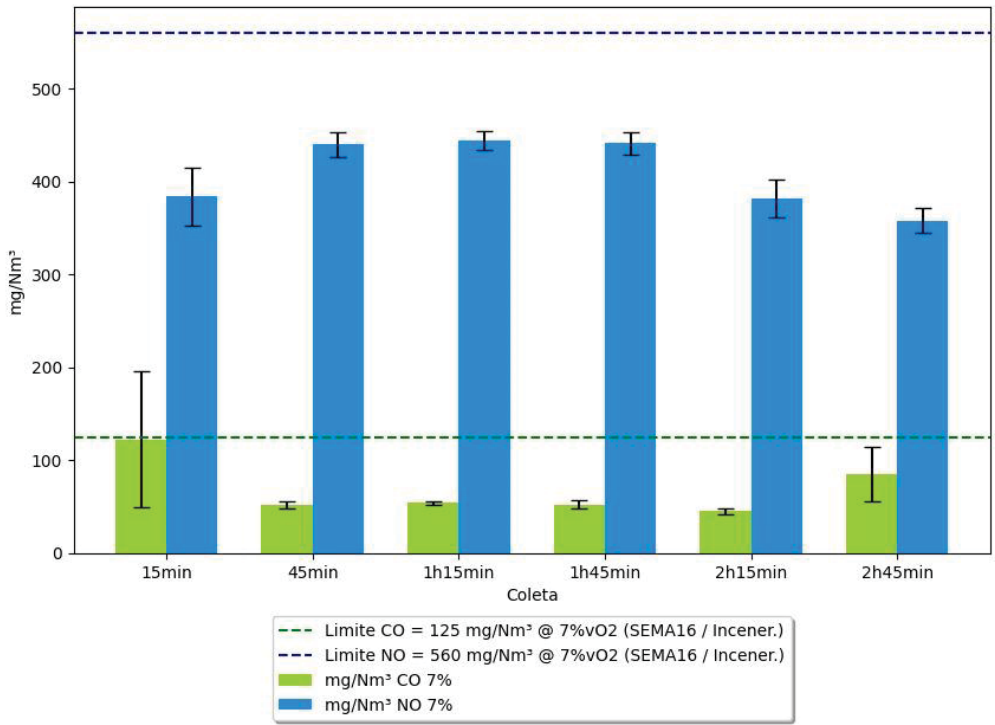
FONTE: A autora (2024).

FIGURA 23 - EMISSÕES DE CO E NO_x A PARTIR DA COMBUSTÃO DO TRATAMENTO TL10, 10% DE LODO FLOTADO



FONTE: A autora (2024).

FIGURA 24 - EMISSÕES DE CO E NO_x A PARTIR DA COMBUSTÃO DO TRATAMENTO TL20, 20% DE LODO FLOTADO



FONTE: A autora (2024).

Como demonstrado nas FIGURA 22, FIGURA 23 e FIGURA 24, todas as emissões de NO_x para os três tratamentos, TL0 (156 mg.Nm^{-3}) TL10 ($453 \text{ (mg.Nm}^{-3})$) e TL20 (405 mg.Nm^{-3}), permaneceram dentro dos limites estabelecidos pela SEMA 16, que é de 560 mg.Nm^{-3} . No entanto, as emissões de CO ultrapassaram o limite permitido pela mesma resolução, que é de 125 mg.Nm^{-3} , no teste realizado com *pellets* de serragem de Pinus. Enquanto isso, os testes com 10% e 20% de lodo flotado demonstraram emissões dentro do limite estabelecido. Adicionalmente, é possível verificar que ambas as emissões permaneceram estáveis ao longo das 3 horas de teste, com exceção dos pontos de coleta inicial. Essa variabilidade inicial pode estar relacionada ao tempo necessário para a estabilização da chama e/ou do equipamento. A estabilidade observada nas emissões ao longo do teste pode ser atribuída ao fato de que a taxa de alimentação dos *pellets* não foi alterada durante os testes, uma vez ajustada, essa taxa foi mantida constante ao longo de todo o período.

Outro aspecto relevante a ser observado nas emissões está relacionado à quantidade maior de emissões de NO_x conforme a adição de lodo flotado nos tratamentos, em comparação com o efeito nas emissões de CO. Essa disparidade pode ser explicada pelas características distintas das matérias-primas utilizadas, considerando que a serragem de Pinus possui uma média de 0,29% de nitrogênio (Chan; Tanksale, 2016; Liu *et al.*, 2018), enquanto o lodo flotado apresenta uma média de 7,65% em suas composições (Mantovan, 2022). A diferença na composição desses elementos influencia diretamente as emissões durante a queima. O aumento nas emissões de NO_x está diretamente ligado à oxidação do nitrogênio presente no lodo flotado durante o processo de combustão, resultando na formação de óxidos de nitrogênio como subproduto (Glushkov *et al.*, 2021; Mitchell *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2020). Portanto, com um teor de nitrogênio mais elevado no lodo, é esperado que as emissões de NO_x aumentem proporcionalmente com a adição dessa matéria-prima na mistura de *pellets*. Por outro lado, a redução nas emissões de CO à medida que o teor de lodo flotado nas misturas aumenta e o teor de serragem de pinus diminui também pode estar associada à presença de nitrogênio no lodo. Isso porque o nitrogênio pode promover reações adicionais durante a combustão, levando à redução das emissões de CO. Essas reações podem incluir a formação de radicais livres que oxidam o CO, resultando em uma combustão mais completa e, consequentemente, em menores emissões de CO (Pio *et al.*, 2020).

Comparando esses resultados com os estudos da literatura, observa-se algumas semelhanças e diferenças. O estudo conduzido por Virmond *et al.* (2011) investigou a combustão de lodo do processamento de carne e serragem. Os resultados mostraram emissões de CO de 93,58 mg.Nm⁻³ e 63,33 mg.Nm⁻³ para serragem e lodo, respectivamente, e emissões de NO_x de 241,58 mg.Nm⁻³ para serragem e 1727,43 mg.Nm⁻³ para lodo. Comparado com os resultados dos testes TL0, TL10 e TL20, observamos que as emissões de CO nos testes com lodo flotado (TL10 e TL20) foram menores do que as observadas no estudo de Virmond *et al.* (2011), enquanto as emissões de NO_x foram menores em todos os testes (TL0, TL10 e TL20) em comparação com as do lodo do processamento de carne.

O estudo de Pio *et al.* (2020) investigou a co-combustão de biomassa florestal residual de eucalipto com lodo primário e secundário da indústria de papel e celulose. Os resultados mostraram que as emissões de NO_x variaram entre mg.Nm⁻³ e 433 mg.Nm⁻³, o que está dentro da faixa observada nos testes TL0, TL10 e TL20. No entanto, as emissões de CO nos testes foram mais altas do que as relatadas no estudo de Pio *et al.* (2020).

No estudo conduzido por De Sena *et al.* (2008), durante a co-combustão de lodo, obtido a partir do tratamento da água residual do processamento da carne de aves e suínos, e serragem, com os gases da chaminé a uma temperatura de 342 °C e em uma proporção de 75% em massa, com teor de nitrogênio de 7,9%, as emissões foram registradas em 636,89 mg.N⁻¹m⁻³ de NO_x, 102,57 mg.N⁻¹m⁻³ de CO e 119,56 mg.N⁻¹m⁻³ de SO_x. Embora as emissões de CO e SO_x estejam dentro dos limites permitidos, as emissões de NO_x foram mais altas do que aquelas observadas nos testes TL0, com um teor de nitrogênio menor que 0,02% a uma temperatura de 367 °C, TL10, a 379 °C, e TL20, a 370°C. Isso sugere uma influência do teor de nitrogênio e das condições de combustão na formação de NO_x.

De maneira geral, o comparativo evidenciou que a composição dos combustíveis desempenha um papel fundamental nas emissões geradas durante a combustão. No estudo realizado por Virmond *et al.* (2011), as emissões de CO e NO_x mostraram variações significativas entre a serragem e o lodo proveniente do processamento de carne, destacando a influência da composição da biomassa nas emissões resultantes. De forma semelhante, De Sena *et al.* (2008) observou que a co-combustão de lodo e serragem produziu emissões diferentes em comparação com a queima desses combustíveis de forma isolada, reforçando a importância da

composição dos combustíveis na formação de emissões. Os resultados obtidos no presente estudo apresentam uma tendência alinhada com aqueles encontrados na literatura.

Sinteticamente, os resultados dos testes de combustão TL0, TL10 e TL20 sugerem que a composição dos combustíveis possui um impacto direto nas emissões resultantes da combustão. A combustão com lodo flotado demonstrou ser uma estratégia eficaz para reduzir as emissões de CO em comparação com a serragem de Pinus pura, enquanto as emissões de NO_x permaneceram dentro dos limites regulatórios. Medidas como recirculação de gases de combustão, distribuição do ar e adição escalonada de combustível podem auxiliar na redução ainda maior dos níveis de NO_x (Virmond *et al.*, 2011). Esses resultados destacam a importância de considerar cuidadosamente a composição dos combustíveis e as condições de operação ao avaliar as emissões resultantes da combustão de biomassa.

Uma observação relevante sobre as emissões gasosas durante os testes de combustão é apresentada na FIGURA 25. Verifica-se que, para todos os três testes (TL0, TL10 e TL20), a densidade colorimétrica permaneceu abaixo de 20% na Escala Ringelmaan, o que está em conformidade com o limite estabelecido pela Resolução CONAMA Nº 8 para emissões de poluentes no ar (CONAMA, 1990). A Escala Ringelmaan é uma tabela de referência amplamente utilizada para avaliar a densidade da fumaça emitida por fontes de poluição, como chaminés industriais (Jorge *et al.*, 2019).

FIGURA 25 - ASPECTO DA FUMAÇA EMITIDA PARA OS TESTES COM A) TL0, B) TL10 E C) TL20 EM COMPARAÇÃO COM A D) ESCALA RINGELMANN



FONTE: A autora (2024).

Uma combustão eficiente, que não gera fumaça, é caracterizada pela transformação completa de todos os elementos resultantes do processo de queima em dióxido de carbono (CO_2), água (H_2O) e calor (Pasa, 2022). Os resultados obtidos (FIGURA 25) corroboram com o fato das emissões de gases poluentes provenientes do uso de *pellets* são menores em comparação com outras formas de aquecimento e energia, como a lenha, devido à eficiência da combustão e à menor liberação de fumaça, decorrentes do baixo teor de umidade dos *pellets* (Oliveira, 2012; Pasa *et al.*, 2022).

4.4.3 Eficiência térmica de um aquecedor de aviário a partir da combustão de *pellets*

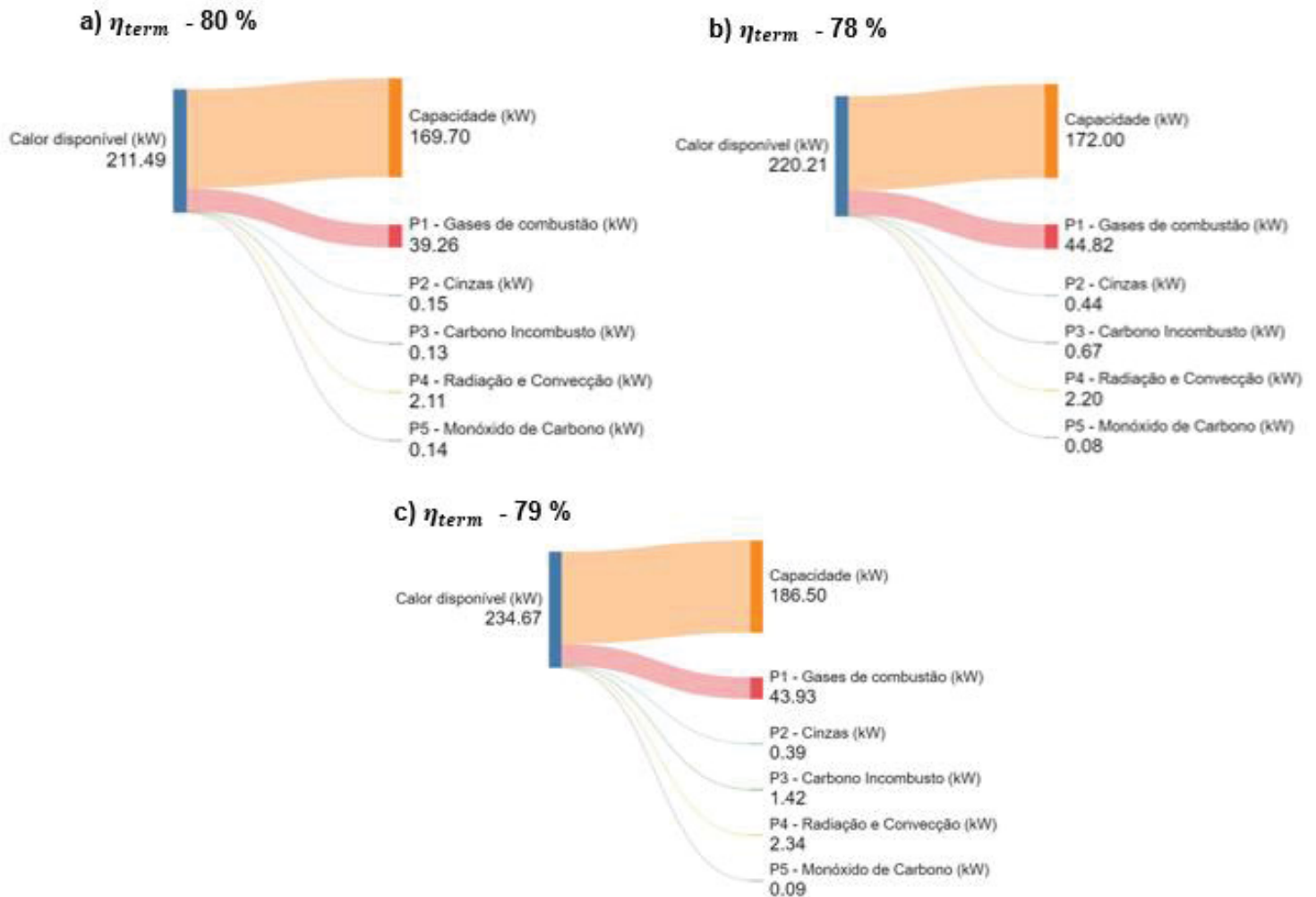
Para a determinação da eficiência térmica do aquecedor Agrobona ab 4000 HIB utilizado nos experimentos foram utilizados os dados de entrada no software EES como W, MV, CZ, CF e PCS dos tratamentos utilizados na queima, onde os cálculos foram realizados de acordo com o exposto no tópico 3.4.1. Os resultados obtidos estão expostos TABELA 22 e FIGURA 26.

TABELA 22 - RESULTADOS PROVENIENTES DO BALANÇO ENERGÉTICO NO AQUECEDOR DE AVIÁRIO MEDIANTE A COMBUSTÃO COM OS *PELLETS* DOS TRATAMENTOS TL0, TL10 E TL20.

Tratamentos	TL0	TL10	TL20
P_1 – Gases de Combustão (kW)	39,3	44,8	43,9
P_2 – Cinzas (kW)	0,15	0,44	0,39
P_3 – Carbono Incombusto (kW)	0,13	0,68	1,42
P_4 – Radiação e Convecção (kW)	2,1	2,1	2,3
P_5 – Monóxido de Carbono (kW)	0,14	0,08	0,09
Q_p – Perdas (kW)	41,8	48,2	48,2
Q_{comb} (kW)	211,5	220,2	234,7
Capacidade (kW)	170	171,9	186,5
η_{term} (%)	80	78	79

FONTE: A autora (2024).

FIGURA 26 - RESULTADOS PROVENIENTES DO BALANÇO ENERGÉTICO NO AQUECEDOR DE AVIÁRIO MEDIANTE A COMBUSTÃO COM OS *PELLETS* DOS TRATAMENTOS TL0, TL10 E TL20.



FONTE: A autora (2024).

Os resultados dos testes de combustão com *pellets* (TL0, TL10 e TL20) foram analisados para entender as implicações de cada variável nas perdas do sistema e na eficiência do equipamento. As perdas por gases de combustão (P1) aumentaram nos tratamentos TL10 e TL20 em comparação com TL0. Especificamente, os valores registrados foram de 39,3 kW para TL0, 44,8 kW para TL10 e 43,9 kW para TL20. Em contrapartida, as perdas relacionadas à presença de CO nos gases de combustão (P5) diminuíram em TL10 e TL20. Os valores registrados foram de 0,14 kW para TL0, 0,08 kW para TL10, e 0,09 kW para TL20, respectivamente. Essas variações sugerem que a adição de lodo nos *pellets* influenciou a dinâmica dos gases durante a queima, alterando o equilíbrio entre os diferentes componentes dos gases emitidos nos

processos de combustão, o que pode estar associado às propriedades específicas dos materiais utilizados em cada tratamento.

As perdas relacionadas às cinzas geradas (P2) aumentaram em TL10 e TL20 devido ao incremento do teor de cinzas nos *pellets* com lodo, conforme evidenciado na FIGURA 26. Os valores correspondentes foram de 0,15 kW para TL0, 0,44 kW para TL10 e 0,39 kW para TL20. Por sua vez, as perdas decorrentes do carbono não queimado presente nas cinzas (P3) aumentaram em TL20, alcançando 1,42 kW, de acordo com o aumento do teor de carbono incombusto devido à adição de lodo, que foi de 3% ($\pm 0,001$) para TL0, 5,23% ($\pm 0,005$) para TL10 e 11,04% ($\pm 0,01$) para TL20. Esse aumento indica uma possível combustão menos eficiente, nesse caso.

As perdas relacionadas à radiação e convecção das paredes do equipamento (P4) permaneceram consistentes nos testes. Os valores foram de aproximadamente 2,1 kW em TL0, 2,1 kW em TL10 e 2,3 kW em TL20.

A eficiência térmica, apresentou uma leve redução em TL10 e TL20 em comparação com TL0. Os valores registrados foram de 80% para TL0, 78% para TL10 e 79% para TL20. Embora tenha havido uma diminuição, é importante destacar que as diferenças entre os valores são mínimas e todas estão próximas. Isso sugere que, apesar das variações nos testes com diferentes composições de *pellets*, a eficiência térmica permaneceu consistentemente em todos os casos. Um ponto relevante a ser considerado é o potencial energético dos *pellets* utilizados em cada teste, uma vez que, conforme houve a adição de lodo, ocorreu também um incremento do poder calorífico inferior dos *pellets* (TABELA 19). Ainda nesse contexto, observa-se que a capacidade térmica do equipamento apresentou um aumento gradual ao longo dos tratamentos, passando de 170 kW em TL0 para 171,9 kW em TL10 e atingindo 186,5 kW em TL20. Esse incremento na capacidade térmica pode ser diretamente associado ao aumento do Poder Calorífico Inferior (PCI) dos *pellets* utilizados, que proporcionou uma maior disponibilidade de energia térmica durante a combustão. A elevação na capacidade do equipamento, acompanhada pelo aumento do PCI, sugere uma melhoria na eficiência energética dos *pellets* conforme o teor de lodo flotado na mistura foi incrementado. Essa constância na eficiência do equipamento entre os testes, mesmo com a variação na composição dos *pellets*, pode indicar que o sistema de combustão se adaptou bem às diferentes condições impostas pelos tratamentos.

No estudo conduzido por Ghorashi e Khandelwal (2023), foram analisadas as emissões e a eficiência térmica dos aquecedores de biomassa sólida. Os resultados

indicam que a fonte de combustível tem um impacto significativo nas emissões e no desempenho térmico. A lenha, como uma madeira crua não processada, pode variar em termos de presença de casca, umidade, tamanho e peso, fatores estes que influenciam não apenas nas emissões, mas também na formação de escória e, conseqüentemente, na eficiência energética dos aquecedores a lenha (Ghorashi; Khandelwal, 2023). A pesquisa revelou que sistemas que empregam a queima de lenha a eficiência podem variar de 59% a 79%. Segundo os autores, essa melhoria foi principalmente atribuída ao controle das perdas de calor dos gases de combustão. No estudo de Mantovan *et al.* (2022) foi realizada a investigação da co-combustão de lodo flotado misturado com cavacos de madeira de eucalipto, com uso de até 20% de lodo flotado em uma caldeira para geração de vapor, a eficiência foi avaliada também conforme a norma ASME PTC 4 (2013). Os resultados mostraram que a eficiência aumentou com até 15% de lodo, devido à redução das perdas de energia nos gases de combustão e menores emissões de CO. Contudo, com 20% de lodo, a eficiência caiu ligeiramente por conta do aumento das perdas de energia e dificuldade na alimentação constante do lodo.

Os resultados indicam que a adição de lodo aos *pellets* utilizados para combustão pode melhorar a eficiência energética, apesar de aumentar as perdas por cinzas e gases de combustão. A eficiência térmica do sistema se manteve relativamente constante, com um leve aumento na capacidade térmica à medida que o teor de lodo foi incrementado. Comparado com outras formas de biomassa, como a lenha, os *pellets* com lodo demonstraram um desempenho competitivo, sugerindo que essa combinação pode ser uma alternativa viável e sustentável para a geração de energia térmica, desde que a composição seja cuidadosamente otimizada. As variações nas perdas relacionadas ao carbono incombusto nas cinzas indicam a necessidade de considerar a composição dos *pellets* para otimizar a eficiência da queima. Segundo as análises de Pio *et al.* (2020), a composição dos gases de combustão pode confirmar uma combustão mais eficiente. Isso corrobora com as justificativas apresentadas por Ghorashi e Khandelwal (2023) e Mantovan *et al.* (2022), que indicam que a composição dos gases de combustão resultaram no aumento da eficiência térmica dos sistemas estudados por ambos.

Os resultados deste estudo demonstraram que a produção de *pellets* a partir de lodo flotado de frigoríficos de aves e peixe, em combinação com serragem de pinus, apresenta características positivas para a geração de energia térmica. Esses *pellets*

possuem um poder calorífico inferior competitivo em relação a outras biomassas comumente utilizadas, além de emissões gasosas dentro dos limites estabelecidos pela SEMA N°42 e uma eficiência térmica constante do aquecedor. Portanto, a produção de *pellets* a partir desse resíduo industrial torna-se uma alternativa competitiva a outras destinações, como a compostagem, que apresenta um custo de R\$ 245 por tonelada, em média, atualmente. Esta alternativa não apenas reduz os custos de disposição e transporte, mas também agrega valor ao resíduo industrial gerado. Contudo, é importante considerar características como a geração de cinzas e o teor de finos para a aplicação eficiente desses *pellets*.

4.5 TENDÊNCIA DE INCRUSTAÇÃO E ESCÓRIA

O conhecimento da tendência de incrustação e escória é essencial para prever o comportamento das cinzas durante a combustão. Os resultados apresentados na TABELA 23 demonstram a análise da estimativa de tendência de formação de escória e incrustação utilizando os tratamentos TL0 – TL95, abrangendo tanto aspectos quantitativos quanto qualitativos.

TABELA 23 - ANÁLISES QUANTITATIVA E QUALITATIVA DOS ÍNDICES DE ESCÓRIA E INCRUSTAÇÃO DE CINZAS DOS TRATAMENTOS TL0 A TL95

ANÁLISE QUANTITATIVA						
Índice	B/A	B/A(+p)	Rs	Fu	Rs(+p)	Fu (+p)
TL0	0,32	0,32	0,003	0,98	0,003	1
TL10	1,38	2,10	0,71	3,72	1,17	8,39
TL20	2,45	3,87	1,42	6,45	2,34	15,79
TL40	4,58	7,42	2,83	11,93	4,68	30,58
TL60	6,71	10,98	4,24	17,40	7,01	45,37
TL80	8,84	14,53	5,65	22,87	9,35	60,16
TL95	10,98	18,08	7,06	28,35	11,69	74,95
ANÁLISE QUALITATIVA						
Índice	B/A	B/A(+p)	Rs	Fu	Rs(+p)	Fu (+p)
TL0	Baixa	Baixa	Baixa	Alta	Baixa	Alta
TL10	Alta	Severa	Média	Alta	Média	Alta
TL20	Severa	Severa	Média	Alta	Alta	Alta
TL40	Severa	Severa	Severa	Alta	Severa	Alta
TL60	Severa	Severa	Severa	Alta	Severa	Severa

TL80	Severa	Severa	Severa	Alta	Severa	Severa
TL95	Severa	Severa	Severa	Alta	Severa	Severa

FONTE: A autora (2024).

Na análise quantitativa, o índice B/A varia significativamente entre os tipos de *pellets*. Por exemplo, TL0, produzido a partir de serragem de pinus, apresenta um índice B/A de 0,32, indicando uma baixa tendência à formação de escória. Em contraste, o índice B/A para TL95, produzido com lodo flotado, é de 10,98, sugerindo uma severa propensão à formação de escória. A adição de pentóxido de fósforo (B/A(+p)) intensifica essa tendência, com TL0 permanecendo em 0,32 e TL95 aumentando para 18,08, evidenciando o impacto significativo do fósforo na formação de escória. Os índices Rs, que indicam a propensão à formação de escória levando em consideração o teor de enxofre na biomassa, e Rs(+p), que considera a adição de pentóxido de fósforo, seguem um padrão similar. TL0 inicia com um valor muito baixo de Rs (0,003), indicando uma tendência mínima à formação de escória. No entanto, este valor aumenta para 7,06 em TL95, indicando uma alta propensão. A adição de pentóxido de fósforo aumenta ainda mais esses valores, com TL95 alcançando 11,69. O índice Fu, relacionado à incrustação, também mostra uma variação significativa. TL0 começa com um valor de 0,98, indicando uma alta tendência à incrustação. À medida que se avança para TL95, esse valor aumenta para 28,35, demonstrando uma tendência crescente. Com a adição de pentóxido de fósforo, os valores de Fu aumentam, com TL95 chegando a 74,95.

Diante dos resultados, fica evidente que os *pellets* contendo maiores proporções de lodo flotado possuem uma tendência maior de formar incrustações em comparação com o tratamento TL0 (95% serragem de pinus). A análise da relação de incrustação B/A(+P) mostra que a adição de pentóxido de fósforo acentua ainda mais essa tendência, destacando sua influência nos índices. Esses resultados estão relacionados com as proporções de Fe_2O_3 e P_2O_5 na composição das cinzas do lodo flotado, que são de 50,24% e 37,04%, respectivamente (Mantovan, 2022).

Virmond *et al.*, (2011), ao avaliarem os índices de escória e incrustação para serragem de madeira (SD) e lodos de dois frigoríficos de processamento de carne (LFP e LFG), obtiveram os seguintes resultados: para a serragem, os valores foram de 0 para Rs e 22,55 para Fu; enquanto que para os lodos, os valores foram de 2,81 e 0 para Rs e 28,08 e 8,57 para Fu, respectivamente. De acordo com os autores, o

agente coagulante aplicado no tratamento físico-químico no LFP, sulfato férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$), modifica a relação B/A devido ao aumento da concentração de Fe_2O_3 nas cinzas, favorecendo a aglomeração. Logo, a utilização de coagulantes durante o tratamento das águas residuais impacta diretamente a composição final das cinzas e, consequentemente, os índices de incrustação e escória (Mantovan, 2022; Padilha *et al.*, 2019; Virmond *et al.*, 2008).

Mantovan (2022), ao analisar os índices de escória e incrustação de lodo flotado do frigorífico de aves e peixes, utilizando cloreto férrico como coagulante, e cavacos de eucalipto, encontrou valores de 7,68 para Rs e 28,14 para Fu no lodo flotado, enquanto que para os cavacos de eucalipto, os valores foram de 0,07 para Rs e 138,36 para Fu. A alta propensão à formação de incrustação pelos cavacos de eucalipto, destacada pela autora, deve-se ao elevado teor de álcalis na composição das cinzas dos cavacos (18,40% Na_2O e 21,69% K_2O), que se decompõem e possuem baixas temperaturas de fusão, favorecendo a formação de escória e incrustação (Garcia-maraver *et al.*, 2017). Yao *et al.* (2020), Kraszkiewicz *et al.* (2020) e Brand *et al.* (2021) avaliaram serragem de pinus e cavacos de pinus, obtendo valores de 1,90, 0,003 e 0,271 para Rs, e 51,60, 1,12 e 1,07 para Fu, respectivamente. Outro fator que influencia a composição final das cinzas e, consequentemente, os índices de escória e incrustação, são as temperaturas adotadas no processo. Yao *et al.* (2020), Kraszkiewicz *et al.* (2020) e Brand *et al.* (2021) utilizaram temperaturas de 600 °C, 1050 °C e 900 °C, respectivamente.

Portanto, a análise dos índices de escória e incrustação não apenas proporciona uma melhor compreensão do comportamento dos diferentes materiais combustíveis, mas também guia a escolha de estratégias de mitigação, como a seleção de coagulantes apropriados e ajustes nas condições de combustão. Isso é crucial para otimizar a eficiência do processo e minimizar os problemas operacionais associados à formação de escória e incrustação. Uma vez que os testes práticos realizados no presente estudos foram de curta duração (3h), não foi possível avaliar na prática a formação de escória e incrustações do equipamento ao longo do tempo, isso deverá ser avaliado em testes de longa duração.

4.6 ANÁLISE DE REGRESSÃO

A análise de regressão é uma ferramenta amplamente utilizada para compreender e modelar a relação entre uma variável dependente (ou resposta) e uma ou mais variáveis independentes (ou explicativas). Este método é empregado quando se busca prever o comportamento de uma variável com base em outras variáveis, permitindo não apenas a modelagem dessa relação, mas também a predição de valores futuros (Berenson *et al.*, 2012). No contexto do presente estudo, a análise de variância de regressão e a estimação das equações pelo método dos mínimos quadrados foram centrais. Portanto, a metodologia utilizada não só permite uma modelagem precisa da relação entre as variáveis envolvidas no estudo, mas também proporciona uma base sólida para a interpretação dos resultados e a tomada de decisões. Na

TABELA 24, estão organizadas as equações obtidas como resultados da análise de regressão do teor de umidade (W), teor de matérias voláteis (MV), teor de cinzas (CZ), teor de carbono fixo (CF), teor de cinzas de acordo com a NBR (Cinzas), teor de finos (TF), densidade a granel e aparente e teor de carbono incombusto.

TABELA 24 - ANÁLISE DE REGRESSÃO DOS RESULTADOS DA ANÁLISE IMEDIATA, TEOR DE CINZAS (NBR), TEOR DE FINOS, DENSIDADE A GRANEL E APARENTE

Variável	Equações	R ²	Coef. variação
W	$W = 0,0007 \times (\%LF^2) - 0,10 \times (\%LF) + 8,61$	0,98	8,28
MV	$MV = -0,00002 \times (\%LF^3) + 0,0049 \times (\%LF^2) - 0,21 \times (\%LF) + 85,23$	0,86	0,83
CZ	$Cz = -0,0002 \times (\%LF^2) + 0,05 \times (\%LF) + 1,33$	0,96	8,46
CF	$CF = 0,00002 \times (\%LF^3) - 0,0044 \times (\%LF^2) + 0,14 \times (\%LF) + 13,51$	0,94	5,45
Cinzas	$Cinzas\ NBR = -0,0004 \times (\%LF^2) + 0,08 \times (\%LF) + 1,92$	0,93	10,50
TF	$TF = e^{-0,0004 \times (\%LF^2) + 0,06 \times (\%LF) + 1,85}$	-	1,81
Densidade a granel	$d_{a\ granel} = 0,02 \times (\%LF^2) - 1,77 \times (\%LF) + 622,57$	0,81	1,42
Densidade aparente	$d_{aparente} = 889,75$	-	13,08
Carbono Incombusto	$C_{inc} = 0,02 \times (\%LF^2) + 0,04 \times (\%LF) + 3$	0,97	1,76

Fonte: A autora (2024).

A análise de regressão apresentada na TABELA 25 revelou que a maioria das variáveis estudadas apresentaram um bom ajuste ao modelo, com coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,8, o que indica uma forte correlação entre as variáveis independentes e dependentes. Além disso, os coeficientes de variação (CV) para essas variáveis ficaram abaixo de 20%, conforme sugerido por dados Montgomery e Runger (2010), o que aponta para uma boa consistência e baixa dispersão dos dados. Especificamente, para o teor de umidade (W), a equação quadrática resultante exibiu um R^2 de 0,98, demonstrando que 98% da variabilidade dos dados foi explicada pelo modelo. O CV de 8,28% reflete uma baixa dispersão, indicando uma elevada precisão na previsão dos valores de umidade. No caso de materiais de voláteis (MV), uma equação cúbica foi utilizada, obtendo um R^2 de 0,86 e um CV extremamente baixo de 0,83%. Embora o modelo seja mais complexo, foi necessário para capturar nuances específicas dos dados que um modelo de grau inferior não seria capaz de representar. Para o carbono fixo (CF) e o teor de cinzas, conforme a NBR, as equações polinomiais ajustadas também mostraram forte correlação, com R^2 de 0,94 e 0,93, respectivamente. Os CVs de 5,45% para CF e 10,50% para cinzas indicam que esses modelos são bastante eficazes em descrever a variabilidade observada, ainda que a variabilidade do teor de cinzas seja ligeiramente maior. No caso do teor de finos (TF), devido à falta de normalidade na distribuição dos dados, foi adotada uma distribuição do tipo gama, uma escolha adequada para dados assimétricos, permitindo uma análise mais robusta e precisa da variável.

A densidade a granel, modelada por uma equação quadrática, apresentou um ajuste moderado com R^2 de 0,81, mas destacou-se pela precisão, com um CV de apenas 1,42%. Este baixo CV sugere que, mesmo com um ajuste moderado, a consistência dos dados foi elevada. Quanto à densidade aparente, devido à elevada variabilidade nos dados, não foi possível desenvolver um modelo equacional representativo. Foi definido, então, um valor médio de 889,75 kg.m⁻³, e o CV de 13,08% revela uma variação considerável, sugerindo que essa variável é altamente sensível às condições experimentais e às características dos materiais utilizados. A inadequação da variável pode estar relacionada à má aglutinação dos materiais devido ao aumento do teor de lodo flotado, à ineficiência do aglutinante e à baixa umidade do material, fatores que contribuíram para uma maior dispersão dos dados de densidade aparente.

Adicionalmente, para o carbono incombusto, foi obtida uma equação quadrática com R^2 de 0,97 e CV de 1,76%, mas é importante ressaltar que esse modelo se aplica apenas a porcentagens de lodo até 20%, dado que a análise foi realizada exclusivamente para os tratamentos TL0, TL10 e TL20, que foram submetidos aos testes de queima. Isso indica um bom ajuste e consistência dos dados dentro do escopo dos tratamentos analisados, embora o modelo não possa ser extrapolado para outras condições sem validação adicional.

Em resumo, a análise de regressão das variáveis estudadas mostrou um bom ajuste dos modelos, com altos coeficientes de determinação e baixos coeficientes de variação, indicando consistência e precisão nos dados. A escolha de modelos específicos, como a distribuição gamma para o teor de finos e o valor médio para a densidade aparente, foi adequada diante da variabilidade dos dados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A inclusão gradual de lodo permitiu avaliar como diferentes concentrações influenciam o desempenho térmico, sendo crucial para desenvolver um produto que maximize o aproveitamento do lodo e minimize os impactos ambientais.

A caracterização físico-química e energética dos *pellets* produzidos revelou importantes propriedades. O poder calorífico aumentou com incremento de lodo flotado, revelando que os tratamentos apresentam um elevado poder calorífico quando comparado a outras biomassas, o que o torna uma fonte de energia eficiente para aplicações de aquecimento, como no caso do aquecedor de aviário avaliado neste trabalho. Além disso, os biocombustíveis sólidos demonstraram características dentro dos limites estabelecidos pela NBR 17030-1 para a classificação como *pellets* para uso industrial, com exceção a parâmetros como teor de finos, cinzas e densidade a granel, o que pode estar vinculado a aglutinação entre os materiais, pelo teor de umidade baixo em relação ao considerado ideal entre 8 – 15 %. Atrelado a isso, foi possível verificar que, a partir da adição de maiores proporções de lodo flotado, ocorre um aumento na geração de cinzas e teor de finos, o que pode afetar a eficiência do processo de queima e requerer medidas adicionais de controle. É importante destacar que, mesmo que os *pellets* com adição de lodo não atendam totalmente aos requisitos da NBR 17013-1, isso não significa, necessariamente, que eles sejam de qualidade inferior. A adição do lodo resulta em uma biomassa distinta, cujas especificações podem diferir devido às particularidades dessa nova composição.

Os testes de queima demonstraram um bom desempenho dos *pellets* contendo lodo, com baixas emissões de poluentes, como CO e NO_x, quando comparados a outras fontes de combustível. Isso sugere que a utilização do lodo na produção de *pellets* pode contribuir para a redução do impacto ambiental associado à combustão de biomassa. Ademais, apesar das variações nos testes com diferentes composições de *pellets*, a eficiência térmica permaneceu consistente em todos os casos.

Além das vantagens técnicas, o uso do lodo como alternativa energética pode gerar benefícios econômicos e socioambientais. Em termos econômicos, a utilização do lodo pode reduzir os custos associados ao descarte desse resíduo, uma vez que muitas vezes a disposição final do lodo requer processos dispendiosos e ambientalmente desafiadores, como aterros sanitários ou tratamentos químicos. Além

disso, a produção de *pellets* a partir do lodo pode criar novas oportunidades de negócios e empregos na indústria, desde a coleta e processamento do lodo até a produção e distribuição dos *pellets*. Isso pode impulsionar o desenvolvimento econômico local e regional. Do ponto de vista socioambiental, o uso do lodo como fonte de energia renovável ao substituir fontes de energia tradicionais, como o carvão, a lenha e os cavacos, por uma alternativa mais limpa e sustentável, o uso do lodo pode contribuir para a melhoria da qualidade do ar e da saúde pública, especialmente em áreas urbanas e industriais onde a poluição do ar é um problema significativo. Outro aspecto importante é o potencial de fechamento do ciclo de nutrientes e a valorização de subprodutos agrícolas. O uso das cinzas do lodo como fertilizante inorgânico após a combustão dos *pellets* pode fornecer nutrientes essenciais para o solo, promovendo a fertilidade e a produtividade agrícola de forma sustentável.

Em resumo, o uso do lodo como alternativa energética não apenas oferece benefícios técnicos, mas também pode gerar impactos positivos do ponto de vista econômico, social e ambiental. Essa abordagem integrada promove a transição para uma economia mais verde e sustentável, alinhada aos objetivos de desenvolvimento sustentável e à mitigação das mudanças climáticas.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros tem-se a realização de um estudo da produção de *pellets* de lodo flotado do frigorífico de aves e peixes com adição de diferentes porcentagens de aglutinante e umidade para avaliação a melhor proporção em função da adequação do teor de finos, densidade a granel e aparente dos *pellets*. Além disso, sugere-se testes de queima mais longos para que se torne possível a avaliação na prática da formação de escória e incrustação e degradação do equipamento ao longo do tempo. Vale ressaltar também a importância da realização da análise de viabilidade econômica para implementação da tecnologia e análise de ciclo de vida (LCA).

REFERÊNCIAS

- 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 D1755 – 01**: Standard Test Method for Ash in Biomass, 2001.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D3176-15**: Standard Practice for Ultimate Analysis of Coal and Coke, 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D4239-18**: Standard Test Method for Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke Using High Temperature Tube Furnace Combustion, 2018.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D4327-17**: Standard Test Method for Anions in Water by Suppressed Ion Chromatography, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D5373-16**: Standard Test Methods for Determination of Carbon, Hydrogen and Nitrogen in Analysis Samples of Coal and Carbon in Analysis Samples of Coal and Coke, 2016.
- 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.
- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (ASME). **ASME PTC 4**: Fired Steam Generators, 2013.
- ABPA, A. B. DE P. A. **Relatório Anual 2024**. 2024.
- ACOSTA, A. P.; AVRELLA, E. D.; ZANATTA, P.; et al. Iheringia, Série Botânica. **Caracterização da madeira de Mimosa scabrella para seleção de árvores matrizes**, v. 78, 2023.
- ANDRIOLA, M. P. PELLETS PRODUZIDOS A PARTIR DA MISTURA DO CAPIM ELEFANTE BRS CAPIAÇU E LODO FLOTADO. , 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA PISCICULTURA. **Anuário Brasileiro da Piscicultura 2023**. São Paulo, 2023.
- BAKER, B. R.; MOHAMED, R.; AL-GHEETHI, A.; AZIZ, H. A. Advanced technologies for poultry slaughterhouse wastewater treatment: A systematic review. **Journal of Dispersion Science and Technology**, v. 42, n. 6, p. 880–899, 2021.

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

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

BERENSON, M.; LEVINE, D.; SZABAT, K. A.; KREHBIEL, T. C. **Basic business statistics: Concepts and applications**. Pearson higher education AU, 2012.

BLASI, C. D.; BRANCA, C.; SANTORO, A.; HERNANDEZ, E. G. Pyrolytic Behavior and Products of Some Wood Varieties. , 2001.

BRAND, M. A.; HENNE, R. A.; SCHEIN, V. A. S.; PEREIRA, E. R. 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.

BRAND, M. A.; MARIANO RODRIGUES, T.; PERETTI DA SILVA, J.; DE OLIVEIRA, J. Recovery of agricultural and wood wastes: The effect of biomass blends on the quality of pellets. **Fuel**, v. 284, p. 118881, 2021.

BRIDGWATER, A. V.; MEIER, D.; RADLEIN, D. An overview of fast pyrolysis of biomass. **Organic Geochemistry**, v. 30, n. 12, p. 1479–1493, 1999.

BURHENNE, L.; MESSMER, J.; AICHER, T.; LABORIE, M.-P. The effect of the biomass components lignin, cellulose and hemicellulose on TGA and fixed bed pyrolysis. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 101, p. 177–184, 2013.

CAI, J.; HE, Y.; YU, X.; et al. Review of physicochemical properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, p. 309–322, 2017.

CAILLAT, S.; VAKKILAINEN, E. Large-scale biomass combustion plants: an overview. **Biomass Combustion Science, Technology and Engineering**. p.189–224, 2013. Elsevier. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780857091314500091>>. Acesso em: 17/9/2023.

CAMARGO, B. S.; BRAGHNI JUNIOR, A.; CAMARGO, S. A.; CARASCHI, J. C. Chemical, physical and thermal characterization of wood pellets from different compositions. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 24, p. 11, 2020.

CARDOSO, B. M. **Uso da Biomassa como Alternativa Energética**, 2012. Projeto de Graduação, Rio de Janeiro-RJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro.

CARRIER, M.; LOPPINET-SERANI, A.; DENUX, D.; et al. Thermogravimetric analysis as a new method to determine the lignocellulosic composition of biomass. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 1, p. 298–307, 2011.

CARRILLO-PARRA, A.; CONTRERAS-TREJO, J. C.; POMPA-GARCÍA, M.; et al. Agro-Pellets from Oil Palm Residues/Pine Sawdust Mixtures: Relationships of Their

Physical, Mechanical and Energetic Properties, with the Raw Material Chemical Structure. **Applied Sciences**, v. 10, n. 18, p. 6383, 2020.

DE CARVALHO SOUZA JR, J. A. **Emissões em processos de combustão**. Unesp, 2003.

CENGEL, Y. A.; BOLES, M. A.; KANOĞLU, M. **Thermodynamics: an engineering approach**. McGraw-hill New York, 2011.

CERON, M. L. P. Controle do excesso de ar em processos de combustão. **FILTRAÇÃO DO AR**, Meio Filtrante., 2010.

CHAN, F. L.; TANKSALE, A. Catalytic steam gasification of pinewood and eucalyptus sawdust using reactive flash volatilization. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 187, p. 310–327, 2016.

CHARIS, G.; DANHA, G.; MUZENDA, E. Characterizations of Biomasses for Subsequent Thermochemical Conversion: A Comparative Study of Pine Sawdust and Acacia Tortilis. **Processes**, v. 8, n. 5, p. 546, 2020.

CHAULA, Z.; SAID, M.; JOHN, G. Thermal Characterization of Pine Sawdust as Energy Source Feedstock. , 2014.

CONAMA. **RESOLUÇÃO CONAMA nº 8**. 1990.

CRISÓSTOMO, M. C.; SILVA, M. F. D.; VALE, A. T. D.; CHAVES, B. S. CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DE MADEIRA DE E. GRANDIS, PINUS SP., T. VULGARIS E P. LECOINTEI. **Recursos Naturais: Energia de Biomassa Florestal**. 1º ed, p.49–61, 2021. Editora Científica Digital. Disponível em: <<http://www.editoracientifica.com.br/articles/code/210203270>>. Acesso em: 8/2/2024.

DE SENA, R. F.; CLAUDINO, A.; MORETTI, K.; et al. Biofuel application of biomass obtained from a meat industry wastewater plant through the flotation process—A case study. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 52, n. 3, p. 557–569, 2008.

DELUCIS, R. D. A.; SANTOS, P. S. B. D.; BELTRAME, R.; GATTO, D. A. CHEMICAL AND FUEL PROPERTIES OF FORESTRY WASTES FROM PINE PLANTATIONS. **Revista Árvore**, v. 41, n. 5, 2018. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-67622017000500207&lng=en&tlng=en>. Acesso em: 24/6/2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional: Relatório Síntese 2023, Ano base 2022**. 2023.

ESCALANTE, J.; CHEN, W.-H.; TABATABAEI, M.; et al. Pyrolysis of lignocellulosic, algal, plastic, and other biomass wastes for biofuel production and circular bioeconomy: A review of thermogravimetric analysis (TGA) approach. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 169, p. 112914, 2022.

EUROPE PELLET COUNCIL. ENplus. **Bioenergy Europe**, 2023. Governamental, . Disponível em: <<https://epc.bioenergyeurope.org/enplus/>>. Acesso em: 7/6/2023.

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. Dissertação de Mestrado, Palotina: Universidade Federal do Paraná.

FAGNANI, K. C.; ALVES, H. J.; CASTRO, L. E. N. D.; KUNH, S. S.; COLPINI, L. M. S. An alternative for the energetic exploitation of sludge generated in the physico-chemical effluent treatment from poultry slaughter and processing in Brazilian industries. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, n. 2, p. 102996, 2019.

FELDMANN, H.; PAISLEY, M.; APPELBAUM, H.; TAYLOR, D. **Conversion of forest residues to a methane-rich gas in a high-throughput gasifier**. Battelle Columbus Div., OH (USA), 1988.

FERIA, M. J.; RIVERA, A.; RUIZ, F.; et al. Energetic Characterization of Lignocellulosic Biomass from Southwest Spain. **International Journal of Green Energy**, v. 8, n. 6, p. 631–642, 2011.

FERREIRA, A.; KUNH, S. S.; CREMONEZ, P. A.; et al. Brazilian poultry activity waste: Destinations and energetic potential. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 3081–3089, 2018.

FLORIANI, S. L.; VIRMOND, E.; LUIZ, D. B.; et al. Potential of Industrial Solid Wastes as Energy Sources and Gaseous Emissions Evaluation in a Pilot Scale Burner (ES2008-54355). **Journal of Energy Resources Technology**, v. 132, n. 1, p. 011003, 2010.

FRAGA, L.; SILVA, J.; TEIXEIRA, J.; et al. The effect of the heating and air flow rate on the mass loss of pine wood particles. . p.17–22, 2018.

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

GARCIA, D. P. CRESCE A PRODUÇÃO DE PELLETS NO BRASIL. , 2017.

GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G.; VIEIRA, F. H. A.; DE PAULA PROTÁSIO, T. Comparative energy properties of torrefied pellets in relation to pine and elephant grass pellets. **BioResources**, v. 13, n. 2, p. 2898–2906, 2018.

GARCÍA, R.; GIL, M.; RUBIERA, F.; PEVIDA, C. Pelletization of wood and alternative residual biomass blends for producing industrial quality pellets. **Fuel**, v. 251, p. 739–753, 2019. Elsevier.

GARCÍA, R.; PIZARRO, C.; ÁLVAREZ, A.; LAVÍN, A. G.; BUENO, J. L. Study of biomass combustion wastes. **Fuel**, v. 148, p. 152–159, 2015.

GARCÍA, R.; PIZARRO, C.; LAVÍN, A. G.; BUENO, J. L. Spanish biofuels heating value estimation. Part II: Proximate analysis data. **Fuel**, v. 117, p. 1139–1147, 2014.

GARCIA-MARAVER, A.; MATA-SANCHEZ, J.; CARPIO, M.; PEREZ-JIMENEZ, J. A. Critical review of predictive coefficients for biomass ash deposition tendency. **Journal of the Energy Institute**, v. 90, n. 2, p. 214–228, 2017.

GHORASHI, S. A.; KHANDELWAL, B. Toward the ultra-clean and highly efficient biomass-fired heaters. A review. **Renewable Energy**, v. 205, p. 631–647, 2023.

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.

GLUSHKOV, D. O.; NYASHINA, G. S.; ANAND, R.; STRIZHAK, P. A. Composition of gas produced from the direct combustion and pyrolysis of biomass. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 156, p. 43–56, 2021.

GUERRERO, L.; OMIL, F.; MÉNDEZ, R.; LEMA, J. M. Protein recovery during the overall treatment of wastewaters from fish-meal factories. **Bioresource Technology**, v. 63, n. 3, p. 221–229, 1998.

HOLM-NIELSEN, J. B.; EHIMEN, E. A. **Biomass supply chains for bioenergy and biorefining**. Woodhead Publishing, 2016.

HUPA, M.; KARLSTRÖM, O.; VAINIO, E. Biomass combustion technology development – It is all about chemical details. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 36, n. 1, p. 113–134, 2017.

IBÁ, I. B. DE Á. **Relatório Anual Ibá de 2022**. Brasil: Ibá, 2023.

IFTIKHAR, M.; ASGHAR, A.; RAMZAN, N.; SAJJADI, B.; CHEN, W. Biomass densification: Effect of cow dung on the physicochemical properties of wheat straw and rice husk based biomass pellets. **Biomass and Bioenergy**, v. 122, p. 1–16, 2019.

IONITA, C. Steam Generators. **Romanian “Generatoare de abur”**, v. 1, 1990.

JACINTO, R. C.; BRAND, M. A.; CUNHA, A. B. DA; SOUZA, D. L.; SILVA, M. V. DA. UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA CADEIA PRODUTIVA DO PINHÃO PARA A PRODUÇÃO DE PELLETS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA. **FLORESTA**, v. 47, n. 3, 2017. Disponível em: <<http://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/52080>>. Acesso em: 11/6/2023.

JENKINS, B. M.; BAXTER, L. L.; JR, T. R. M.; MILES, T. R. Combustion properties of biomass. , 1998.

JORGE, G. G.; MAZZAROTTO, A. A. V. DE S.; DA ROCHA. EVALUATION OF EMISSIONS OF CARBON MONOXIDE (CO) IN A FLAMOTUBULAR BOILER USING NATURAL GAS. , v. 9, 2019.

JUNGINGER, M.; SIKKEMA, R.; FAAIJ, A. Analysis of the global pellet market. , 2009.

KRASZKIEWICZ, A.; SANTORO, F.; PASCUZZI, S. Emmission of Sulphur Oxides from Agricultural Solid Biofuels Combustion. **Agricultural Engineering**, v. 24, n. 4, p. 35–45, 2020.

KUNH, S. S.; TAVARES, M. H. F.; DA SILVA, E. A.; et al. Briquette production from a mixture of biomass: poultry slaughterhouse sludge and sawdust. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 42, p. 64192–64204, 2022.

LEE, H.-H.; KANG, S.-B.; CHOI, J.-J.; et al. Co-Firing Combustion Characteristics of Woodchips and Spent Mushroom Substrates in a 400 kWth Stoker-Type Boiler. **Energies**, v. 15, n. 23, p. 9096, 2022.

LI, W.; HUANG, Y.; XIE, J.; et al. Assessment of Flammulina velutipes residue as potential fuels for co-combustion with pine sawdust from characteristics of combustion process, flue gases and ashes. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 158, p. 105156, 2021.

LIU, Z.; LIU, X.; FEI, B.; et al. The properties of pellets from mixing bamboo and rice straw. **Renewable Energy**, v. 55, p. 1–5, 2013.

LIU, Z.; ZHANG, F.; LIU, H.; et al. Pyrolysis/gasification of pine sawdust biomass briquettes under carbon dioxide atmosphere: Study on carbon dioxide reduction (utilization) and biochar briquettes physicochemical properties. **Bioresource Technology**, v. 249, p. 983–991, 2018.

LORENCI WOICIECHOWSKI, A.; DALMAS NETO, C. J.; PORTO DE SOUZA VANDENBERGHE, L.; et al. Lignocellulosic biomass: Acid and alkaline pretreatments and their effects on biomass recalcitrance – Conventional processing and recent advances. **Bioresource Technology**, v. 304, p. 122848, 2020.

LOUÇÃO, I. J. G. Valorização da biomassa florestal, proveniente da doença de nemátodo de pinheiro, para produção de peletes. , 2008. FCT-UNL.

LUBWAMA, M.; YIGA, V. A.; MUHAIRWE, F.; KIHEDU, J. Physical and combustion properties of agricultural residue bio-char bio-composite briquettes as sustainable domestic energy sources. **Renewable Energy**, v. 148, p. 1002–1016, 2020.

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

MANTOVAN, F. D. M. **ESTUDO DA QUEIMA DE LODO FLOTADO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES EM CALDEIRA A BIOMASSA**, 2022. Palotina: Universidade Federal do Paraná.

MANTOVAN, F. DE M.; TELEKEN, J. G.; DE OLIVEIRA, A. F.; BURIN, E. L. K.; BAZZO, E. CO-COMBUSTION OF FLOATED SLUDGE FROM A SLAUGHTERHOUSE WASTERWATER TREATMENT PLANT WITH EUCALYPTUS WOODCHIPS IN A BIOMASS STEAM GENERATOR. , 2022.

MARANGWANDA, G. T.; MADYIRA, D. M.; BABARINDE, T. O. Combustion models for biomass: A review. **Energy Reports**, v. 6, p. 664–672, 2020.

MASCHE, M.; PUIG-ARNAVAT, M.; JENSEN, P. A.; et al. From wood chips to pellets to milled pellets: The mechanical processing pathway of Austrian pine and European beech. **Powder Technology**, v. 350, p. 134–145, 2019.

MASIÁ, A. A. T.; BUHRE, B. J. P.; GUPTA, R. P.; WALL, T. F. Characterising ash of biomass and waste. **Fuel Processing Technology**, v. 88, n. 11–12, p. 1071–1081, 2007.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource Technology**, v. 83, n. 1, p. 37–46, 2002.

MENEGHINI, C.; PROINELLI, R.; PINTRO, D. A. B. Avaliação técnica e econômica da co-combustão de lodo frigorífico primário para geração de vapor. , p. 7, 2015.

MITCHELL, E. J. S.; LEA-LANGTON, A. R.; JONES, J. M.; et al. The impact of fuel properties on the emissions from the combustion of biomass and other solid fuels in a fixed bed domestic stove. **Fuel Processing Technology**, v. 142, p. 115–123, 2016.

MLONKA-MĘDRALA, A.; MAGDZIARZ, A.; GAJEK, M.; NOWIŃSKA, K.; NOWAK, W. Alkali metals association in biomass and their impact on ash melting behaviour. **Fuel**, v. 261, p. 116421, 2020.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied statistics and probability for engineers**. John wiley & sons, 2010.

MORAES, M. D. A. D.; SANTOS, J. H. D.; LIMA, P. A. F. E.; et al. Bioenergia com resíduos do desdobro da madeira de Pinus caribaea var. hondurensis. **Revista de Ciências Agrárias**, p. 520- 527 Páginas, 2019. [object Object].

DE MORAES, S. L.; PERES MASSOLA, C.; MAZIERO MAZIERO SACCOCCIO, E.; PEREIRA DA SILVA, D.; BASILE TUKOFF GUIMARÃES, Y. Cenário brasileiro da geração e uso de biomassa adensada. **REVISTA IPT TECNOLOGIA E INOVAÇÃO**, v. 1, n. 4, 2017. Disponível em: <<http://revista.ipt.br/index.php/revistaIPT/article/view/37/33>>. Acesso em: 6/7/2022.

NAIK, S.; GOUD, V. V.; ROUT, P. K.; JACOBSON, K.; DALAI, A. K. Characterization of Canadian biomass for alternative renewable biofuel. **Renewable Energy**, v. 35, n. 8, p. 1624–1631, 2010.

NASCIMENTO, S. M.; DUTRA, R. I. J. P.; NUMAZAWA, S. RESÍDUOS DE INDÚSTRIA MADEIREIRA: CARACTERIZAÇÃO, CONSEQUÊNCIAS SOBRE O MEIO AMBIENTE E OPÇÕES DE USO. **Holos Environment**, v. 6, n. 1, p. 08, 2006.

NBR 17030. **ABNT NBR 17030 - Pellets — Terminologia e método de ensaios**. Rio de Janeiro, RJ: Abnt, 2022.

NBR 17030-1. **ABNT NBR 17013-1 - Pellets — Requisitos e classificação**. Rio de Janeiro, RJ: Abnt, 2022.

NIEDZIÓŁKA, I. Assessment of the energetic and mechanical properties of pellets produced from agricultural biomass. **Renewable Energy**, 2015.

NIU, Y.; LV, Y.; LEI, Y.; et al. Biomass torrefaction: properties, applications, challenges, and economy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 115, p. 109395, 2019.

NUNES, L. J. R.; GODINA, R.; MATIAS, J. C. O.; CATALÃO, J. P. S. Evaluation of the utilization of woodchips as fuel for industrial boilers. **Journal of Cleaner Production**, v. 223, p. 270–277, 2019.

NUNES, L. J. R.; MATIAS, J. C. O.; CATALÃO, J. P. S. Mixed biomass pellets for thermal energy production: A review of combustion models. **Applied Energy**, v. 127, p. 135–140, 2014.

NUSSBAUMER, T. Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction. **Energy & Fuels**, v. 17, n. 6, p. 1510–1521, 2003.

O. FERNANDEZ, B.; F. GONÇALVES, B.; C. C. PEREIRA, A.; et al. Mechanical and Energetic Characteristics of Briquettes Produced from Different Types of Biomass. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 1, p. 29–38, 2017.

OBERNBERGER, I. Physical characteristics and chemical composition of solid biomass fuels. **Thermochemical Biomass Conversion. Eindhoven University of Technology**, 2003.

OLIVEIRA, C. Pelletização: Processo de pelletização. **Revista da Madeira**, , n. 138, 2014. Disponível em:
<http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1739&subject=Pelletiza%E7%E3o&title=Processo%20de%20pelletiza%E7%E3o>. .

OLIVEIRA, C. M. **PELLETS COMO FONTE DE AQUECIMENTO NA AVICULTURA**. Curitiba (PR): Brasil Biomassa e Energia Renovável (ABIB), 2017.

OLIVEIRA, C. M. DE. Wood Pellets Brasil. **Associação Brasileira das Indústrias de Biomassa e Energia Renovável**, 2012.

OLIVEIRA, L. H.; BARBOSA, P. V. G.; LIMA, P. A. F.; YAMAJI, F. M.; SETTE JÚNIOR, C. R. Aproveitamento de resíduos madeireiros de Pinus sp. com diferentes granulometrias para a produção de briquetes. **Revista de Ciências Agrárias**, p. 683- 691 Páginas, 2017. Revista de Ciências Agrárias.

OZDEMIR, S.; DEMIR, M. S. Biofuel characteristics and combustion emissions of poultry litter and lignocellulosic biomass. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v. 40, n. 3, p. e13555, 2021.

OZDEMIR, SAIM; ŞİMŞEK, A.; OZDEMIR, SERKAN; DEDE, C. Investigation of poultry slaughterhouse waste stream to produce bio-fuel for internal utilization. **Renewable Energy**, v. 190, p. 274–282, 2022.

OZGEN, S.; CERNUSCHI, S.; CASERINI, S. An overview of nitrogen oxides emissions from biomass combustion for domestic heat production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 135, p. 110113, 2021.

ÖZYUĞURAN, A.; YAMAN, S. Prediction of Calorific Value of Biomass from Proximate Analysis. **Energy Procedia**, v. 107, p. 130–136, 2017.

PADILHA, J.; KUREK, A. P.; SOUZA, O.; SELLIN, N. Avaliação da potencialidade energética de lodos gerados no tratamento de efluentes de abatedouro e frigorífico de aves. , p. 17, 2019.

PALMA, A.; PARIS, E.; CARNEVALE, M.; et al. Biomass Combustion: Evaluation of POPs Emissions (VOC, PAH, PCB, PCDD/F) from Three Different Biomass Prunings (Olive, Citrus and Grapevine). **Atmosphere**, v. 13, n. 10, p. 1665, 2022.

PARASCHIV, L. S.; SERBAN, A.; PARASCHIV, S. Calculation of combustion air required for burning solid fuels (coal / biomass / solid waste) and analysis of flue gas composition. **Energy Reports**, v. 6, p. 36–45, 2020.

PARASCHIV, S.; CONSTANTIN, D.-E.; PARASCHIV, S.-L.; VOICULESCU, M. OMI and Ground-Based In-Situ Tropospheric Nitrogen Dioxide Observations over Several Important European Cities during 2005–2014. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 14, n. 11, p. 1415, 2017.

PARASCHIV, S.; PARASCHIV, L.-S. Analysis of traffic and industrial source contributions to ambient air pollution with nitrogen dioxide in two urban areas in Romania. **Energy Procedia**, v. 157, p. 1553–1560, 2019.

PASA, D. L. **EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E EMISSÕES DE GEE DO PROCESSO DE COMBUSTÃO DE BIOMASSA FLORESTAL**, 2022. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria.

PASA, D. L.; KUHN, N.; ANTONIO DE FARIAS, J.; HERMES, D.; ROESCH, F. Implementação de uma economia de baixo carbono na secagem do tabaco por meio do uso de biomassa florestal. **Advances in Forestry Science**, v. 9, n. 2, p. 1781–1789, 2022.

PELANDA, K. A.; POTULSKI, D. C.; SILVA, D. A.; FERRAZ, F. A. Avaliação das Possíveis Implicações do Uso de Diferentes Biomassas Florestais como Biocombustível em Geradores de Vapor. **Revista Ciência da Madeira - RCM**, v. 6, n. 2, p. 112–121, 2015.

PEREIRA, B. L. C.; CARNEIRO, A. D. C. O.; CARVALHO, A. M. M. L.; et al. INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE LIGNINA KRAFT NAS PROPRIEDADES DE PELLETS DE EUCALIPTO. **FLORESTA**, v. 46, n. 2, p. 235, 2016.

PEREIRA, J. L. C. **Cinética da Cogaseificação de Lodo de Esgoto Sanitário e Serragem de Pinus com Vapor de Água em um Reator Termogravimétrico.**, 2021. Florianópolis-SC: Universidade Federal de Santa Catarina.

PERSHAGEN, G. Air pollution and cancer. **IARC scientific publications**, , n. 104, p. 240–251, 1990.

PETERSON, M.; NANDI, V. DE S.; ZACCARON, A.; PEREIRA, S. I.; FERNANDES, P. Estudo da incorporação de cinza proveniente da queima de lenha de eucalipto na

formulação de massa de uma indústria cerâmica estrutural do sul - catarinense. , 2016.

PIO, D. T.; TARELHO, L. A. C.; NUNES, T. F. V.; BAPTISTA, M. F.; MATOS, M. A. A. Co-combustion of residual forest biomass and sludge in a pilot-scale bubbling fluidized bed. **Journal of Cleaner Production**, v. 249, p. 119309, 2020.

PRONOBIS, M. Evaluation of the influence of biomass co-combustion on boiler furnace slagging by means of fusibility correlations. **Biomass and Bioenergy**, v. 28, n. 4, p. 375–383, 2005.

QUÉNO, L. R. M.; SOUZA, Á. N. DE; COSTA, A. F. DA; VALE, A. T. DO; JOAQUIM, M. S. Aspectos técnicos da produção de pellets de madeira. **Ciência Florestal**, v. 29, p. 1478–1489, 2019. SciELO Brasil.

RAPP, V.; KILLINGSWORTH, N.; THERKELSEN, P.; EVANS, R. Lean-burn internal combustion engines. **Lean Combustion**, p. 111–146, 2016. Elsevier.

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

ROKNI, E.; REN, X.; PANAHI, A.; LEVENDIS, Y. A. Emissions of SO₂, NO_x, CO₂, and HCl from Co-firing of coals with raw and torrefied biomass fuels. **Fuel**, v. 211, p. 363–374, 2018.

SAEED, M. A.; ANDREWS, G. E.; PHYLAKTU, H. N.; GIBBS, B. M. Global kinetics of the rate of volatile release from biomasses in comparison to coal. **Fuel**, v. 181, p. 347–357, 2016.

SANTOS, L. B.; STRIEBECK, M. V.; CRESPI, M. S.; RIBEIRO, C. A.; DE JULIO, M. Characterization of biochar of pine pellet. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 122, n. 1, p. 21–32, 2015.

SANTOS, L. R. O.; VARANDA, L. D.; HANSTED, A. L. S.; et al. Different Types of Lignocellulosic Materials for Energy Generation in the Ceramic Industry. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. spe2, p. e20180440, 2019.

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.

SH, L.; LEE, B.-H.; JEONG, T.-Y.; JEON, C.-H. Effects of different pretreatment methods on the grindability of pitch pine sawdust biomass and its blends with coal. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 34, n. 5, p. 2235–2243, 2020.

SILVA, J.; TEIXEIRA, S.; TEIXEIRA, J. A Review of Biomass Thermal Analysis, Kinetics and Product Distribution for Combustion Modeling: From the Micro to Macro Perspective. **Energies**, v. 16, n. 18, p. 6705, 2023.

DE SOUZA, H. J. P. L.; ARANTES, M. D. C.; VIDAURRE, G. B.; et al. Pelletization of eucalyptus wood and coffee growing wastes: strategies for biomass valorization and

sustainable bioenergy production. **Renewable Energy**, v. 149, p. 128–140, 2020. Elsevier.

SOUZA, M. M. D.; CARNEIRO, A. D. C. O.; VITAL, B. R.; BARBOSA, A. C. Produção e avaliação de pellets compostos por diferentes proporções de resíduos sólidos urbanos. **Nature and Conservation**, v. 13, n. 3, p. 80–92, 2020.

STANČIN, H.; MIKULČIĆ, H.; WANG, X.; DUIĆ, N. A review on alternative fuels in future energy system. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 128, p. 109927, 2020.

STASIAK, M.; MOLEND, M.; BAŃDA, M.; et al. Mechanical and combustion properties of sawdust—Straw pellets blended in different proportions. **Fuel Processing Technology**, v. 156, p. 366–375, 2017.

STEENARI, B.-M.; KARLSSON, L. G.; LINDQVIST, O. Evaluation of the leaching characteristics of wood ash and the influence of ash agglomeration. **Biomass and Bioenergy**, 1999.

STOLARSKI, M. J.; STACHOWICZ, P.; DUDZIEC, P. Wood pellet quality depending on dendromass species. **Renewable Energy**, v. 199, p. 498–508, 2022.

SU, Y.; LUO, Y.; WU, W.; ZHANG, Y.; ZHAO, S. Characteristics of pine wood oxidative pyrolysis: Degradation behavior, carbon oxide production and heat properties. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 98, p. 137–143, 2012.

SUKARTA, I. N.; SASTRAWIDANA, I. D.; AYUNI, N. P.; I, S. PROXIMATE ANALYSIS AND CALORIFIC VALUE OF PELLETS IN BIOSOLID COMBINED WITH WOOD WASTE BIOMASS. **Journal of Ecological Engineering**, v. 19, n. 3, p. 185–190, 2018.

SUN, J.; SHEN, Z.; ZENG, Y.; et al. Characterization and cytotoxicity of PAHs in PM2.5 emitted from residential solid fuel burning in the Guanzhong Plain, China. **Environmental Pollution**, v. 241, p. 359–368, 2018.

SUN, J.; SHEN, Z.; ZHANG, L.; et al. Impact of primary and secondary air supply intensity in stove on emissions of size-segregated particulate matter and carbonaceous aerosols from apple tree wood burning. **Atmospheric Research**, v. 202, p. 33–39, 2018.

SUPAPORN, P.; YEOM, S. H. Optimization of a two-step biodiesel production process comprised of lipid extraction from blended sewage sludge and subsequent lipid transesterification. **Biotechnology and Bioprocess Engineering**, v. 21, n. 4, p. 551–560, 2016.

SZYMAJDA, A.; LASKA, G.; JOKA, M. Assessment of Cow Dung Pellets as a Renewable Solid Fuel in Direct Combustion Technologies. , v. 14, n. 4, 2021.

TAVARES, S. R. DE L.; TAVARES, M. A. DE M. E. PERSPECTIVAS PARA A PARTICIPAÇÃO DO BRASIL NO MERCADO INTERNACIONAL DE PELLETS. **HOLOS**, v. 5, p. 292–306, 2015.

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

URNS, S. An introduction to combustion: Concepts and applications.(pp. 256-263). , 2006. Boston, MA: McGraw-Hill.

TURZYŃSKI, T.; KLUSKA, J.; KARDAŚ, D. Study on chicken manure combustion and heat production in terms of thermal self-sufficiency of a poultry farm. **Renewable Energy**, v. 191, p. 84–91, 2022.

UNFRIED, L. C.; YOSHI, C. V. H. Sustentabilidade no abate e processamento de aves. **FACESI em Revista**, v. 4, p. 1–14, 2012.

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

VASSILEV, S. V.; BAXTER, D.; ANDERSEN, L. K.; VASSILEVA, C. G. 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.

VIDAURRE, G.; LOMBARDI, L. R.; OLIVEIRA, J. T. D. S.; ARANTES, M. D. C. Lenho juvenil e adulto e as propriedades da madeira. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 4, p. 469–480, 2011.

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

VIRMOND, E.; FLORIANI, S.; MOREIRA, R.; JOSÉ, H. Co-combustion of wood chips with the biomass obtained from the physico-chemical treatment of slaughterhouse wastewater for steam generation-A case study. . p.1177–1188, 2008.

VIRMOND, E.; SCHACKER, R. L.; ALBRECHT, W.; et al. Organic solid waste originating from the meat processing industry as an alternative energy source. **Energy**, v. 36, n. 6, p. 3897–3906, 2011.

WANG, G.; DAI, Y.; YANG, H.; et al. A Review of Recent Advances in Biomass Pyrolysis. **Energy & Fuels**, v. 34, n. 12, p. 15557–15578, 2020.

WZOREK, M.; JUNGA, R.; YILMAZ, E.; NIEMIEC, P. Combustion behavior and mechanical properties of pellets derived from blends of animal manure and lignocellulosic biomass. **Journal of Environmental Management**, v. 290, p. 112487, 2021.

YAO, X.; ZHAO, Z.; LI, J.; et al. Experimental investigation of physicochemical and slagging characteristics of inorganic constituents in ash residues from gasification of different herbaceous biomass. **Energy**, v. 198, p. 117367, 2020.

YAO, X.; ZHENG, Y.; ZHOU, H.; et al. Effects of biomass blending, ashing temperature and potassium addition on ash sintering behaviour during co-firing of pine sawdust with a Chinese anthracite. **Renewable Energy**, v. 147, p. 2309–2320, 2020.

YAO, Z.; MA, X.; WU, Z.; YAO, T. TGA–FTIR analysis of co-pyrolysis characteristics of hydrochar and paper sludge. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 123, p. 40–48, 2017.

YILMAZ, S.; SELIM, H. A review on the methods for biomass to energy conversion systems design. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 25, p. 420–430, 2013.

YUZBASI, N. S.; SELÇUK, N. Air and oxy-fuel combustion characteristics of biomass/lignite blends in TGA-FTIR. **Fuel Processing Technology**, v. 92, n. 5, p. 1101–1108, 2011.

ZAMORANO, M.; POPOV, V.; RODRÍGUEZ, M. L.; GARCÍA-MARAVÉ, A. A comparative study of quality properties of pelletized agricultural and forestry logging residues. **Renewable Energy**, v. 36, n. 11, p. 3133–3140, 2011.

ANEXO I – CERTIFICADO CALIBRAÇÃO TEXTO 340



Serviços Industriais
Calibração



Página Page 1/3

Certificado de calibração Calibration certificate

99024/1

Objeto Object	340	0600 9766
Descrição Description	Analizador de gases	---
Fabricante Manufacturer	Testo	Testo
Número de série Serial number	62395108	20743971
Identificação Identification	---	---
Sensores Sensors	O2 - 0 à 25 %mol/mol - Resolução: 0,01 %mol/mol - S/nº 46566150 CO - 0 à 10000 µmol/mol - Resolução: 1 µmol/mol - S/nº 00174966 NO - 0 à 4000 µmol/mol - Resolução: 1 µmol/mol - S/nº 00079840	

Este certificado de calibração documenta a rastreabilidade aos padrões nacionais, que compreende as unidades de medida de acordo com o Sistema Internacional de Unidades (SI).

A CGCRE é signatária do Acordo de Reconhecimento Mútuo da Cooperação Internacional de Acreditação de Laboratórios (ILAC).

This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).

The Cgcre is Signatory of the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) Mutual Recognition Arrangement.

Cliente Customer	EDUARDO LUCAS KONRAD BURIN
Endereço Address	RUA MAURÍCIO CARDOSO, 180, OSWALDO CRUZ, CEP: 85950-000, PELOTINA/PR
Contratante Contractor	O mesmo
Endereço Address	O mesmo
Ordem de serviço Order number	99024

Este certificado de calibração não pode ser reproduzido exceto na íntegra e com a permissão do laboratório de emissão. Certificados de calibração sem assinatura não são válidos. Este certificado refere-se exclusivamente ao instrumento mencionado acima. Esta calibração não isenta o instrumento do controle metrológico estabelecido na regulamentação metrológica. This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of the issuing laboratory. Calibration certificates without signature are not valid. This certificate refers exclusively to the instrument mentioned above. This calibration does not exempt the metrological control of the facility set in the metrological regulations.

Data da calibração Calibration date
28/06/2023
Data da emissão Emission date
29/06/2023

Local da calibração Calibration location
Laboratório da Testo do Brasil
Técnico Technician
Guilherme Merêncio da Silva

Signatário autorizado Authorized signatory

Edivaldo Dourado Santos



Be sure.

Serviços Industriais

Calibração



Página Page 2/3

Certificado de calibração Calibration certificate

99024/1

Equipamentos de medição Measuring equipment

Index	Referência Reference	Rastreabilidade Traceability	Prox. Calibração Next cal.	Nº certificado Certificate nº
a	Padrão 11	Coregas PTY LTD	set-26	QCSPC027984
b	Padrão 28	Coregas PTY LTD	fev-25	QCSPC023451
c	Padrão 12	Coregas PTY LTD	set-27	QCSPC030717
d	Padrão 13	Coregas PTY LTD	mar-25	QCSPC029235
e	---	---	---	---
f	---	---	---	---
g	---	---	---	---
h	---	---	---	---

Condições ambientais Ambient conditions

Temperatura Temperature

19... 28°C

Pressão Pressure

930 ... 950 hPa

Umidade Humidity

45 ... 70%ur rF

Densidade do ar Air density

--- kg/m³

Procedimento de medição Measuring procedure

O instrumento foi calibrado realizando três leituras em cada gás de referência e expressa a média como resultado de cada ponto, conforme PO 5.4-003 Rev 11. The instrument was calibrated by taking three readings in each reference gas and expressing the average as a result of each point, according PO 5.4-003 Rev 11.

Resultados das medições Measuring results

[illegible]

Serviços Industriais
Calibração



99024/1

Certificado de calibração Calibration certificate

Resultados das medições após o ajuste de base de dados							
Nº	Unidade de medida Unit measurement	Valor de referência Reference value	Valor medido Measured value	Erro de medição Measurement error	Incerteza de medição expandida Expanded measurement uncertainty		
					Valor Value	Fator de abrangência k Coverage factor k	V _{eff}
01	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
02	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
03	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
04	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
05	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
06	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
07	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
08	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
09	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
10	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
11	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
12	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
13	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
14	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
15	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
16	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
17	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
18	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
19	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
20	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
21	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
22	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
23	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
24	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
25	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
26	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
27	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
28	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
29	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
30	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
31	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
32	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
33	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
34	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
35	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
36	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
37	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
38	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
39	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
40	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
41	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
42	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
43	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
44	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
45	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
46	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
47	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
48	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
49	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00
50	mm	100,00	100,00	0,00	0,00	1,96	0,00

1	Erro de medição = Valor Medido - Valor de referência e v_{eff} - Graus de liberdade efetivos.
2	A incerteza de medição expandida relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k (descrito acima), o qual para uma distribuição t-student com v_{eff} (descrito acima) graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. Se $v_{eff} = \infty$, então a distribuição normal é $k = 2$.
3	A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.
4	O ajuste ou reparo quando realizado, não faz parte do escopo de acreditação do laboratório.
5	Este certificado atende aos requisitos de acreditação da Cgcre, que avaliou a competência do laboratório.
6	Conversão de unidades: $1 \mu\text{mol/mol} = 1 \text{ ppm} = 0,0001\% \text{ mol/mol}$.
7	As unidades de leitura descritas acima referem-se somente aos respectivos valores de referência, leitura no instrumento, desvio encontrado e valor da incerteza de medição. Os valores do valor k e v_{eff} são adimensionais.



Be sure.

Serviços Industriais
CalibraçãoCertificado
Rastreável

Página 1 de 1

Certificado de Calibração

N° 99024/2

Dados do Cliente

Cliente: EDUARDO LUCAS KONRAD BURIN
 Endereço: RUA MAURÍCIO CARDOSO, 180, OSWALDO CRUZ, CEP: 85950-000, PELOTINA/PR
 Contratante: O mesmo
 Endereço: O mesmo

Dados do Instrumento

Instrumento: Monitor de gases
 Marca: Testo
 Modelo: 340
 Identificação Cliente: Não Consta
 Número de Série: 62395108
 Id. Sensor/Sonda: 0600 9766

Faixa(s) de Medição: Dióxido de Enxofre - 0..5000 ppm

Dados da Calibração

DATA DA CALIBRAÇÃO: 28/06/2023
 ORDEM DE SERVIÇO N°: 99024
 LOCAL DA CALIBRAÇÃO: Laboratório da Testo

DATA DE EMISSÃO: 28/06/2023
 CONDIÇÕES AMBIENTAIS: Temperatura: 23 ± 5°C e Umidade: 45 à 70%ur.

Dados do Procedimento

O analisador foi calibrado realizando três leituras em cada gás de referência e expressa a média como resultado de cada ponto.
 Procedimento interno: PO - 5.4-003 revisão 11

Dados dos Padrões

Código	Descrição	Data Calibração	N° do Certificado	Laboratório	Validade
Padrão 13 - SO ₂	Gás referência SO ₂ 1000 ppm	03/03/22	QCSPC029235	Coregas PTY LTD	mar-25

Resultados

Tipo do gás: Dióxido de Enxofre		N° de série do sensor: 38797100				
VALOR DE REFERÊNCIA	LEITURA NO INSTRUMENTO	ERRO ENCONTRADO	INCERTEZA EXPANDIDA MEDIÇÃO			UNIDADE
			VALOR	FATOR k	v_{eff}	LEITURA
1,008	983	-25	50	2,00	∞	µmol/mol

Observações

- 1 - Erro encontrado = Leitura no instrumento - valor de referência e v_{eff} = Graus de liberdade efetivos.
- 2 - Esta calibração não isenta o instrumento do controle metrológico estabelecido na regulamentação metrológica.
- 3 - A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k (descrito acima), o qual para uma distribuição t-student com v_{eff} (descrito acima) graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. Se $v_{eff} = \infty$, então a distribuição é normal e k = 2.
- 4 - A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.
- 5 - O presente certificado refere-se exclusivamente ao instrumento calibrado sendo proibida a reprodução parcial deste certificado.
- 6 - Conversão de unidades: 1 µmol/mol = 1 ppm = 0,0001% mol/mol.
- 7 - As unidades de leitura descritas acima referem-se somente aos respectivos valores de referência, leitura no instrumento, desvio encontrado e valor da incerteza de medição. Os valores do valor k e v_{eff} são adimensionais.
- 8 - O ajuste ou reparo quando realizado, não faz parte do escopo de acreditação do laboratório.
- 9 - Número de série da sonda é 20743971.

Técnico Executante: Guilherme Merêncio da Silva

Signatário Autorizado
 Edivaldo Dourado Santos

Testo do Brasil - Instrumentos de Medição Ltda.

Rua Guapuruvu, 299 - Lot. Alphaville Campinas, CEP 13098-322 - Campinas - SP - Brasil
 Fone: 19 3731-5800 - E-mail: tis@testo.com.br - www.testo.com.br

Certificado
Rastreável