

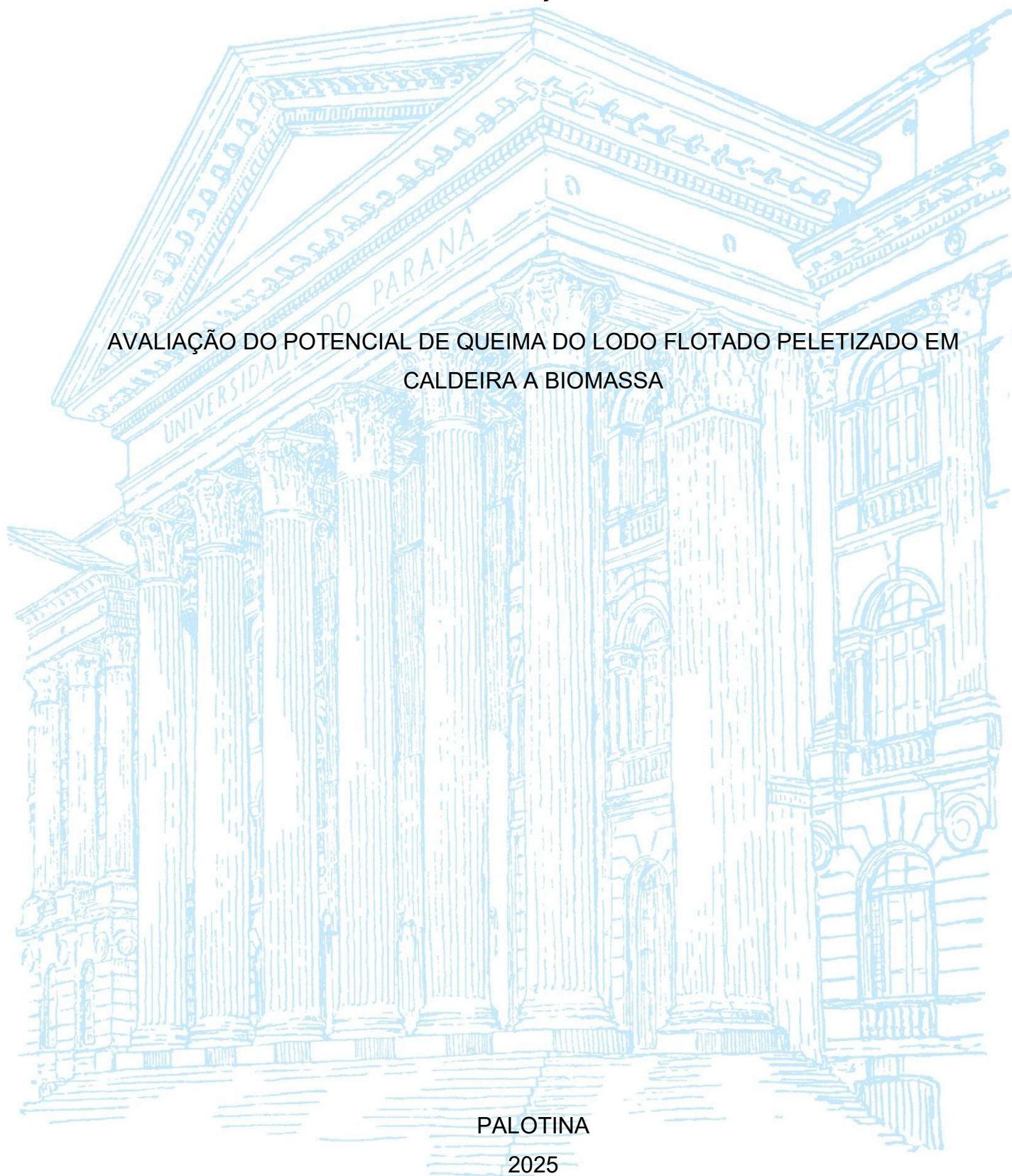
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ADRIEL MENDONÇA FIGUEIREDO

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE QUEIMA DO LODO FLOTADO PELETIZADO EM
CALDEIRA A BIOMASSA

PALOTINA

2025



ADRIEL MENDONÇA FIGUEIREDO

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE QUEIMA DE LODO FLOTADO PELETIZADO EM
CALDEIRA A BIOMASSA

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

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Lucas Konrad Burin

PALOTINA

2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ATA DE REUNIÃO

Aos cico dias do mês de dezembro do ano de 2025, das 9h30min ao 12h00min, no Setor Palotina, via plataforma Teams; compareceram para defesa pública do Trabalho de Conclusão de Curso, requisito obrigatório para a obtenção do título de Engenheiro de Energia o(a) aluno(a) **Adriel Mendonça Figueiredo**, tendo como Título do Trabalho de Conclusão de Curso "AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE QUEIMA DO LODO FLOTADO PELETIZADO EM CALDEIRA A BIOMASSA". Constituíram a Banca Examinadora: **Prof. Dr. Eduardo Lucas Konrad Burin (Orientador e Presidente da Banca)**, **Profa. Dra. Adriana Ferla de Oliveira** e o **Prof. Dr. Joel Gustavo Teleken**. O(a) orientador(a) e Presidente da Banca concedeu a palavra ao(a) aluno(a), para exposição do seu trabalho. A seguir, foi concedida a palavra em ordem sucessiva aos membros da Banca de Exame, os quais passaram a arguir o discente. Ultimada a defesa, que se desenvolveu nos termos normativos, a Banca de Exame, em sessão secreta, passou aos trabalhos de julgamento, tendo atribuído ao discente as seguintes notas: **Prof. Dr. Eduardo Lucas Konrad Burin, nota: 90 (noventa)**, **Profa. Dra. Adriana Ferla de Oliveira, nota: 90 (noventa)**, e o **Prof. Dr. Joel Gustavo Teleken, nota: 90 (noventa)**. A nota final do discente, após a média aritmética dos três membros da banca de exame, foi **90 (noventa)** considerando o discente **APROVADO**. As considerações e sugestões feitas pela Banca de Exame deverão ser atendidas pelo discente sob acompanhamento de seu orientador. Nada mais havendo a tratar foi lavrada a presente ata, que, lida e aprovada, vai por todos assinada eletronicamente.



Documento assinado eletronicamente por **EDUARDO LUCAS KONRAD BURIN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/12/2025, às 13:50, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **JOEL GUSTAVO TELEKEN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/12/2025, às 14:40, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **ADRIANA FERLA DE OLIVEIRA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/12/2025, às 10:25, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida [aqui](#) informando o código verificador **8056085** e o código CRC **DFFCA1D3**.

Dedico este trabalho à minha família e à minha noiva Aline, que sempre acreditaram em mim e me apoiaram em todo o momento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, primeiramente pelas bênçãos concedidas, por iluminar meu caminho e proteger em todo o momento.

Agradeço à minha família, por acreditar em mim e se fazerem presentes mesmo estando longe.

Agradeço a Aline, por todo o amor e companheirismo, por dividir os desafios, por estar presente nos momentos bons e difíceis. Obrigado por acreditar em mim e por me fazer sentir amado.

Agradeço ao Dr. Joel Teleken, por confiar em meu trabalho e pela orientação e desafios compartilhados nas diversas pesquisas ao longo de minha jornada acadêmica.

Ao Dr. Thompson Weiser, que sempre se dispôs a compartilhar conhecimento e por ser um parceiro nos projetos científicos.

Ao Dr. Eduardo Burin, pela orientação acadêmica e profissional, pelo conhecimento passado e pelo tempo dedicado às nossas conversas. Agradeço por ter aceitado o desafio de ser o professor orientador deste trabalho.

Agradeço aos colegas que dividiram a caminhada na UFPR comigo, pelos trabalhos realizados em equipe, por toda as conversas e momentos vividos. Em especial aos grandes amigos Vinicius e Matheus, pelo apoio nas horas de estudo, pelas conversas e cafés durante a estadia em nossa casa.

Agradeço aos professores do curso de Engenharia de Energia, por todo o conhecimento e experiências de compartilhadas.

Agradeço à UFPR e aos laboratórios LPB e Labmater pela estrutura, espaço e confiança para a realização dos trabalhos científicos.

Agradeço à Cooperativa Agroindustrial por disponibilizar tempo, espaço e recursos para a realização deste trabalho.

RESUMO

A expansão do agronegócio no Brasil e a crescente demanda pela destinação correta de resíduos da indústria de carnes culminam na necessidade de explorar novas estratégias de tratamento. O lodo centrifugado é um subproduto do tratamento de efluentes cujo potencial energético pode ser aproveitado na combustão em caldeiras a biomassa. A peletização deste lodo resulta em um material com menor umidade e melhor maneabilidade, otimizando seu uso em queimadores. Desta forma, o presente estudo avaliou o potencial de queima de pellets de lodo com lodo centrifugado e cavaco de eucalipto em uma caldeira flamotubular mista, analisando parâmetros operacionais, emissões de gases e eficiência energética. A metodologia baseou-se no método indireto de cálculo de eficiência (ASME PTC 4), utilizando o software EES. Os testes de queima em campo consideraram o limite de 20% de resíduos na mistura (SEMA nº 42/2008), avaliando três condições: o cenário atual (15% de lodo centrifugado) e dois cenários de incremento com *pellets* de lodo (adição de 3% e 6% em massa). Os resultados demonstraram que a adição destes *pellets* propicia maior eficiência energética devido ao baixo teor de umidade. As emissões de CO, NOx e SOx mantiveram-se abaixo dos limites da Resolução SEMA 16/14, embora tenha sido observado um aumento na concentração de SOx proporcional ao incremento de *pellets*, associado ao enxofre contido no lodo. A inserção de quantidades superiores ao cenário com 3% de *pellets* ultrapassa os limites de teor energético de resíduos permitidos pela legislação ambiental vigente, tornando necessária aprovação legal para incinerar o volume total de resíduos na mistura. Contudo, a queima do volume excedente de lodo na forma de *pellets* é uma alternativa interessante, pois culmina em um material com maior densidade energética, reduzindo a quantidade de lodo enviado para compostagem e o consumo de cavaco.

Palavras-chave: Caldeira; resíduos; eficiência energética; lodo peletizado.

ABSTRACT

The expansion of agribusiness in Brazil and the growing demand for the proper disposal of meat industry waste highlight the need to explore new treatment strategies. Centrifuged sludge is a byproduct of effluent treatment whose energy potential can be harnessed through combustion in biomass boilers. Pelletizing this sludge results in a material with lower moisture content and improved handling, optimizing its use in burners. Thus, this study evaluated the combustion potential of pelletized sludge in a mixed fire-tube boiler, analyzing operational parameters, gas emissions, and energy efficiency. The methodology was based on the indirect efficiency calculation method (ASME PTC 4), using EES software. Field combustion tests considered the 20% waste mixture limit (SEMA No. 42/2008), evaluating three conditions: the current scenario (15% centrifuged sludge) and two scenarios with *pellet* increments (addition of 3% and 6% by mass). Results showed that adding *pellets* yields higher energy efficiency due to low moisture content. CO, NO_x, and SO_x emissions remained below SEMA Resolution 16/14 limits, although an increase in SO_x concentration proportional to the *pellet* increase was observed, associated with the sulfur content in the sludge. Adding amounts exceeding the 3% *pellet* scenario surpasses the limits for waste energy content permitted by current environmental legislation, requiring legal approval to incinerate the total waste volume in the mixture. However, the combustion of the excess sludge volume in the form of pellets is an interesting alternative, as it culminates in a material with higher energy density, reducing the amount of sludge sent for composting and the consumption of wood chips.

Keywords: Boiler; waste; energy efficiency; pelletized sludge.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Fontes de biomassa e seus processos de conversão	19
FIGURA 2 – Matriz Energética Brasileira 2024	21
FIGURA 3 – Fluxograma simplificado do processo de peletização.....	22
FIGURA 4 – Fluxo dos gases quentes de combustão.....	24
FIGURA 5 – Representação esquemática da unidade geradora de vapor	26
FIGURA 6 – Escopo do trabalho	27
FIGURA 7 – Descarregamento de cavaco na unidade	30
FIGURA 8 – Baía de coleta de lodo	31
FIGURA 9 – <i>Pellet</i> de lodo	32
FIGURA 10 – Fluxo da quantificação da participação dos combustíveis	37

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – Eficiência térmica da caldeira.....	39
GRÁFICO 2 – Balanço de massa e energia.....	42

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Dosagem de <i>pellet</i> ao cavaco	28
TABELA 2 – Propriedades do cavaco e lodo em base seca	29
TABELA 3 – Teor de umidade dos combustíveis	38
TABELA 4 – Emissões gasosas dos testes	40
TABELA 5 – Temperatura de pontos de orvalho para o lodo centrifugado e <i>pellet</i> de lodo	41

Lista de abreviaturas OU siglas

°C	- Graus Celsius (temperatura)
ABPA	- Associação Brasileira de Produção Animal
ASME	- American Society of Mechanical Engineers
ASTM	- American Society for Testing and Materials
CONAMA	- Conselho Nacional do Meio Ambiente
C	- Carbono
C1-C4	- Cenários de estudo de queima
CO	- Monóxido de carbono
CO ₂	- Dióxido de carbono
EES	- Engineering Equation Solver
EMBRAPA	- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
H	- Hidrogênio
Hz	- Hertz (frequência)
IAP	- Instituto Ambiental do Paraná
KM	- Quilômetro
LPB	- Laboratório de Produção de Biocombustíveis
KGF/CM ²	- Quilograma-força por centímetro quadrado (pressão)
MME	- Ministério de Minas e Energias
NR	- Norma Regulamentadora
NOx	- Óxidos de nitrogênio
Peixe BR	- Associação Brasileira da Piscicultura
PCI	- Poder Calorífico Inferior
PCS	- Poder Calorífico Superior
S	- Enxofre
SOx	- Óxidos de enxofre
TON/H	- Toneladas por hora (vazão)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	PROBLEMA.....	15
1.2	OBJETIVOS	15
1.2.1	Objetivo geral	15
1.2.2	Objetivos específicos.....	16
1.3	JUSTIFICATIVA.....	16
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	18
2.1	BIOMASSA.....	18
2.2	LODO FLOTADO DO TRATAMENTO DE EFLUENTES.....	20
2.3	PELLETS.....	21
2.4	CALDEIRA.....	23
2.5	COMBUSTÃO	24
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	26
3.1	ESCOPO DO TRABALHO.....	27
3.2	BIOMASSAS UTILIZADAS	28
3.2.1	Cavaco de Eucalipto.....	30
3.2.2	Lodo centrifugado	31
3.2.3	Peletização do lodo	32
3.3	ANÁLISE DO DESEMPENHO DA UNIDADE.....	33
3.3.1	Teor de umidade e PCI.....	33
3.3.1	Eficiência térmica de combustão	34
3.3.2	Medição dos gases de combustão	35
3.4	TEMPERATURA DE ORVALHO DO H ₂ SO ₄	35
3.5	ESTIMATIVA DE ECONOMIA DE CAVACO.....	36
4	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	38
4.1	TEOR DE UMIDADE DAS BIOMASSAS.....	38
4.2	EFICIÊNCIA TÉRMICA DA UNIDADE GERADORA DE VAPOR.....	34
4.3	MEDIÇÃO DOS GASES	35
4.4	PROPENSÃO À FORMAÇÃO DE H ₂ SO ₄	36
4.5	ESTIMATIVA DE ECONOMIA DE CAVACO.....	37
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	38

REFERÊNCIAS.....	45
ANEXO 1 – EQUAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE COMBUSTÃO (.EES)	47

1 INTRODUÇÃO

A avicultura no Brasil ocupa uma posição de destaque, desempenhando um papel fundamental na economia e na sociedade do país. Em 2024, a produção nacional atingiu 14,972 milhões de toneladas de carne de frango, consolidando o país como o 3º maior produtor e o 1º maior exportador do mundo (ABPA, 2025). O abate e o processamento da carne de aves envolvem diversas atividades controladas, nas quais a água é um insumo essencial. Segundo Fagnani (2017), o consumo em um abatedouro varia entre 20 e 30 litros por ave abatida. Ao final do processo, essa água converte-se em efluente que necessita de tratamento adequado. Deste tratamento, especificamente da etapa de flotação físico-química, obtém-se o lodo flotado, que passa por cozimento e centrifugação para a separação de óleo, água residual clarificada e lodo centrifugado.

Atualmente, a destinação final mais comum do lodo (que possui cerca de 65% de umidade) é a compostagem. Essa prática implica a contratação de empresas especializadas para a retirada e o tratamento do resíduo, gerando custos operacionais significativos com mão de obra e frete (Fagnani, 2017). Nesse contexto, o aproveitamento do potencial energético desse resíduo em queimadores surge não apenas como uma alternativa de destinação, mas também como um incremento de eficiência, dado o seu alto poder calorífico.

Os *pellets* são biocombustíveis granulados resultantes da compactação de matéria-prima sob alta pressão, o que confere ao material baixo teor de umidade e maior densidade energética (Andriola, 2023). Resíduos madeireiros e agrícolas, como serragem e aparas, são frequentemente utilizados na sua produção (Lima, 2024). Diversos estudos têm analisado a viabilidade de combinar esses materiais — como capim-elefante (Andriola, 2023) e serragem de pinus (Lima, 2024) — com o lodo centrifugado. Essa mistura apresenta-se como uma proposta sustentável e eficaz, tornando o uso do lodo mais atrativo para a queima em caldeiras a biomassa.

Na agroindústria objeto de análise neste estudo, a co-combustão de lodo centrifugado (65% de umidade) com cavaco de madeira já é uma realidade: aproximadamente 69% da "farinheta" de lodo gerada é encaminhada para queima na caldeira. No entanto, cerca de 15 toneladas por dia ainda são destinadas à compostagem. Diante desse volume excedente de material não incinerado, identifica-

se a oportunidade de convertê-lo em *pellets*, avaliando os impactos de seu aumento na matriz de combustíveis da indústria.

1.1 PROBLEMA

A agroindústria onde ocorreu este estudo, está localizada em Palotina, região oeste do Paraná e possui a capacidade de abater 630 mil aves por dia. O vapor é essencial para esta atividade, sendo utilizado nas etapas de escaldagem, lavagem de caixas, higienização e outras. Este vapor é fornecido pela caldeira flamotubular mista instalada na unidade, projetada para atender vazões de 40 ton/h sob a pressão de 15 kgf/cm².

O cavaco de madeira, aliado ao lodo centrifugado, forma a mistura combustível utilizada na caldeira. Ao todo, são queimados em média 165 ton/dia de cavaco e 30 ton/dia de lodo, estabelecendo uma proporção de 15% de lodo centrifugado adicionado ao cavaco.

O lodo centrifugado é um material com grande potencial energético. Na indústria, são produzidas cerca de 45 toneladas por dia, das quais 30 toneladas são destinadas à queima na caldeira da unidade agroindustrial; portanto, a quantia diária de 15 toneladas permanece destinada à compostagem, gerando custos adicionais com o processamento e o frete deste material.

A peletização deste material excedente e seu acréscimo na mistura combustível utilizado atualmente, implicaria no aumento do teor de resíduo total da mistura, entretanto, resultaria em uma densidade energética maior devido ao menor teor de umidade e a compactação do lodo na forma de *pellet*.

Neste sentido, torna-se necessário avaliar cenários distintos em que este material excedente possa ser processado e efetivamente reaproveitado na indústria, garantindo uma destinação apropriada, emissões dentro dos limites e a redução de consumo de cavaco.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar o potencial energético da adição de *pellet* de lodo à mistura de cavaco de eucalipto e lodo centrifugado utilizados para combustão em caldeira da agroindústria de aves e peixes.

1.2.2 Objetivos específicos

- Conduzir testes de queima do lodo peletizado em gerador de vapor industrial, sob condições de concentração em massa variadas, em conjunto com lodo centrifugado e cavaco de eucalipto. O cenário atual (15% de lodo centrifugado) e dois cenários de incremento com *pellets* de lodo (adição de 3% e 6% em massa);
- Identificar dificuldade ou variabilidade operacional ocasionada pela inclusão do *pellet* de lodo na mistura de combustíveis;
- Determinar a eficiência térmica de combustão da unidade geradora de vapor nos diferentes cenários de teste;
- Avaliar os impactos da adição de *pellets* de lodo à mistura de combustíveis, incluindo: análise da formação de ácidos, das emissões gasosas e da economia de cavaco;
- Estimar a economia de cavaco proporcionada pela substituição parcial por *pellet*.

1.3 JUSTIFICATIVA

Ao longo da cadeia produtiva de proteína animal, diversos resíduos são gerados, o que torna necessárias a adequada destinação e a avaliação de potenciais energéticos. Muito comumente, os resíduos das agroindústrias são tratados por empreendedores externos, podendo ser destinados à compostagem ou mesmo a aterros sanitários. A reutilização destes materiais pode representar uma destinação mais adequada, além de despertar o potencial econômico ainda pouco explorado.

Dentre os vários resíduos, o lodo centrifugado representa uma parcela em que já há aproveitamento energético, podendo ser empregado em queimadores de biomassa para aproveitamento de seu poder calorífico. No Brasil, a peletização já vem sendo aplicada em diversos tipos de biomassa, como aparas de madeiras e bagaço

de cana-de-açúcar, devido ao baixo teor de umidade e elevada densidade energética e às propriedades favoráveis ao aproveitamento térmico. A peletização do lodo centrifugado representa inovação nos processos de destinação de resíduos, amplia os horizontes do potencial energético da matéria e reduz os produtos nocivos decorrentes da queima do lodo centrifugado.

Desta forma, torna-se necessário o estudo do poder de queima do lodo na forma de *pellets* em uma caldeira, somado ao lodo centrifugado, respeitando as normas ambientais vigentes, e avaliando o impacto deste combustível no equipamento. Estes efeitos podem ser observados de forma abrangente, visando não só a redução do consumo de combustível primário (cavaco de madeira), como também emissões gasosas, formação de ácidos e variabilidades operacionais do equipamento.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 BIOMASSA

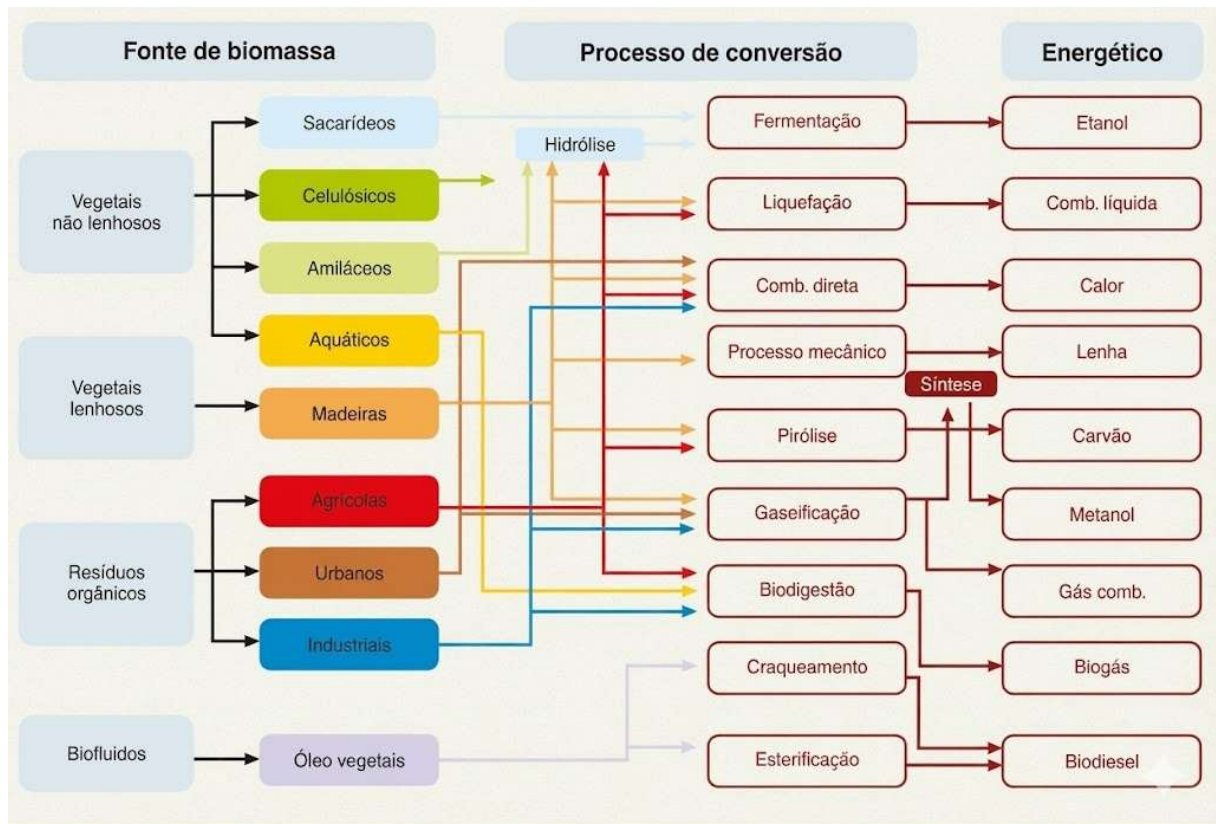
A biomassa pode ser compreendida como qualquer matéria orgânica que possa ser convertida em energia térmica, mecânica ou elétrica, sendo utilizada desde os primórdios da civilização humana (Santos et al., 2017). Geralmente aplicada em processos térmicos, é uma fonte promissora no Brasil, oferecendo uma conversão energética com menor impacto ambiental em comparação aos combustíveis fósseis. De acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME), a biomassa desempenha papel relevante na matriz nacional, representando cerca de 8,55% na matriz energética brasileira, o que abrange mais de 630 usinas e soma uma capacidade instalada superior a 16,7 GW (MME, 2023).

Diferentemente dos recursos fósseis, que demandam milhões de anos para sua formação geológica, a biomassa é renovável em curto prazo. Essa característica permite que seus materiais constituintes — que variam de resíduos florestais e agropecuários a resíduos urbanos e industriais — sejam repostos ciclicamente (MME, 2023).

Segundo a EMBRAPA (2016), esta fonte energética classifica-se em dois grandes grupos: a biomassa tradicional, composta essencialmente por lenha e resíduos naturais não processados; e a biomassa moderna. Esta última é resultado de processos tecnológicos que aumentam a eficiência energética, incluindo biocombustíveis líquidos, cogeração e biocombustíveis sólidos densificados, como briquetes e *pellets*.

A obtenção desse material pode ocorrer a partir de vegetais lenhosos e não lenhosos, bem como de resíduos orgânicos, e o método de conversão energética depende diretamente da natureza da fonte, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1: Fontes de biomassa e seus processos de conversão



Fonte: EMBRAPA (2016)

A principal rota de aproveitamento energético da biomassa sólida é a combustão direta em fornos e caldeiras. Nesse processo, a energia química armazenada na matéria orgânica é convertida em calor (Mantovan, 2022), que é transferido para um fluido de trabalho (geralmente vapor d'água) para alimentar processos industriais ou gerar eletricidade.

Embora os derivados de madeira (cavacos e lenha) oriundos de reflorestamento sejam amplamente utilizados em caldeiras, o setor busca alternativas para diversificar a matriz e reduzir a pressão sobre os recursos florestais. Nesse contexto, o aproveitamento energético de resíduos, por meio de tecnologias de densificação (peletização) e técnicas de co-combustão (mistura de combustíveis), surge como uma estratégia viável para a administração sustentável dos recursos finitos (Thek; Obernberger, 2012).

2.2 LODO FLOTADO DO TRATAMENTO DE EFLUENTES

O mercado de carne de frango, têm apresentado um aumento constante no decorrer dos últimos anos. O relatório anual da Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA) relata que, em 2024, foram produzidas 14,942 milhões de toneladas de carne de frango, resultando no valor bruto de R\$ 106,0 bilhões (ABPA, 2024). Desta produção total, 5,295 milhões de toneladas foram destinadas à exportação, consolidando o Brasil como 3º maior exportador mundial de carne de frango.

A produção brasileira de peixes de cultivo no ano de 2024 cresceu 9,21% em comparação ao ano anterior. No total, foram produzidas 968.724 toneladas. De acordo com a Associação Brasileira da Piscicultura (Peixe BR), este crescimento foi o maior entre os dez anos de pesquisa da organização, demonstrando a robustez do mercado de peixes, considerando os momentos de instabilidade (ABP, 2025).

Os rejeitos resultantes do processamento de carne no frigorífico contêm altas cargas orgânicas, sólidos dissolvidos e em suspensão, além da presença de óleos e graxas (Fagnani, 2017). A composição destes rejeitos apresenta grande variabilidade, oriunda da lavagem de caminhões, carcaças e vísceras, da movimentação de subprodutos e resíduos, da esterilização de facas e de outras.

O tratamento de efluentes em frigoríficos geralmente são separados entre primário e secundário. Segundo Fagnani (2017), o tratamento primário consiste no peneiramento, tanque de equalização, flotores físico-químicos, enquanto o tratamento secundário, em lagoas de estabilização ou sistemas de lodos ativados.

No tratamento físico-químico, objetiva-se remover o máximo de sólidos presentes no efluente através da adição de coagulantes, que desestabilizam as partículas sólidas, seguido do floculante que agrupam os sólidos em bolhas que se movimentam até a superfície onde são removidas por processos físicos como raspagem ou sucção (Fagnani, 2017; Lima, 2023). Este material, chamado de lodo flotado, é aquecido a 95°C e encaminhado para o decanter centrífugo que realiza a separação em três fases: óleo, efluente clarificado e lodo centrifugado.

O frigorífico onde este estudo foi realizado possui capacidade de produzir, em média, 45 toneladas por dia de lodo centrifugado. Deste montante, 30 toneladas são transportadas para uma moega instalada sobre a correia transportadora de cavaco, que despeja o material com o auxílio de duas roscas sem-fim. Considerando que a caldeira consome, em média, 165 toneladas de cavaco por dia, a mistura de

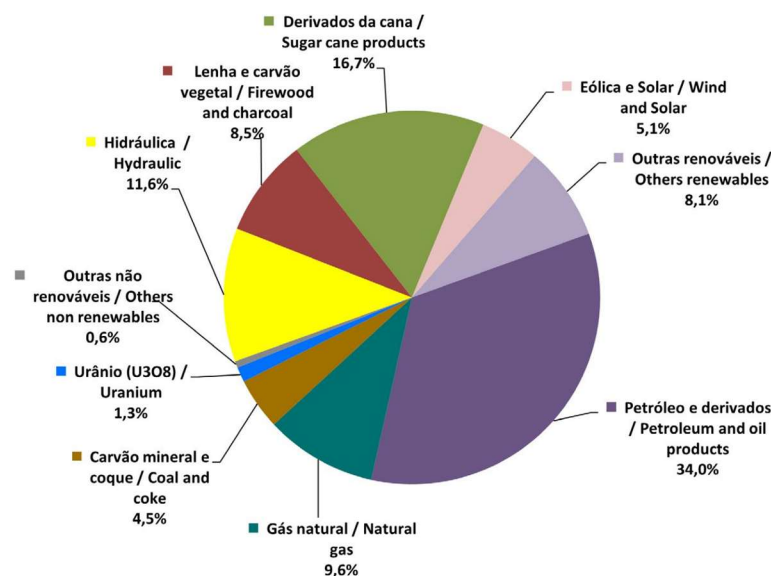
combustível é composta por 15% de lodo centrifugado. Por outro lado, o volume excedente não queimado na caldeira, de 15 toneladas por dia de abate, continua sendo destinado para a compostagem, onde são necessários custos com frete, processamento e conformidade do terceiro com requisitos ambientais.

O remanejamento do lodo não queimado para a produção de *pellets* resulta na redução da umidade e da geração de finos, e no aumento da dureza e durabilidade. Diversos estudos abordam a adição de lodo a *pellets* com outros resíduos, como serragens, podas e bagaços, resultando no aumento do teor de cinzas e do poder calorífico, variando conforme a quantidade de lodo adicionada (Andriola, 2023).

2.3 PELLETS

A crescente demanda de energia e a necessidade em reduzir a dependência por combustíveis fósseis, incentivam a procura por combustíveis renováveis com menores impactos ambientais. De acordo com a EPE (2025), no ano de 2024, cerca 34% da matriz energética nacional foi composta por petróleo e derivados, demonstrando que há um grande consumo de combustíveis fósseis no país.

Figura 2: Matriz Energética Brasileira 2024



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (2025)

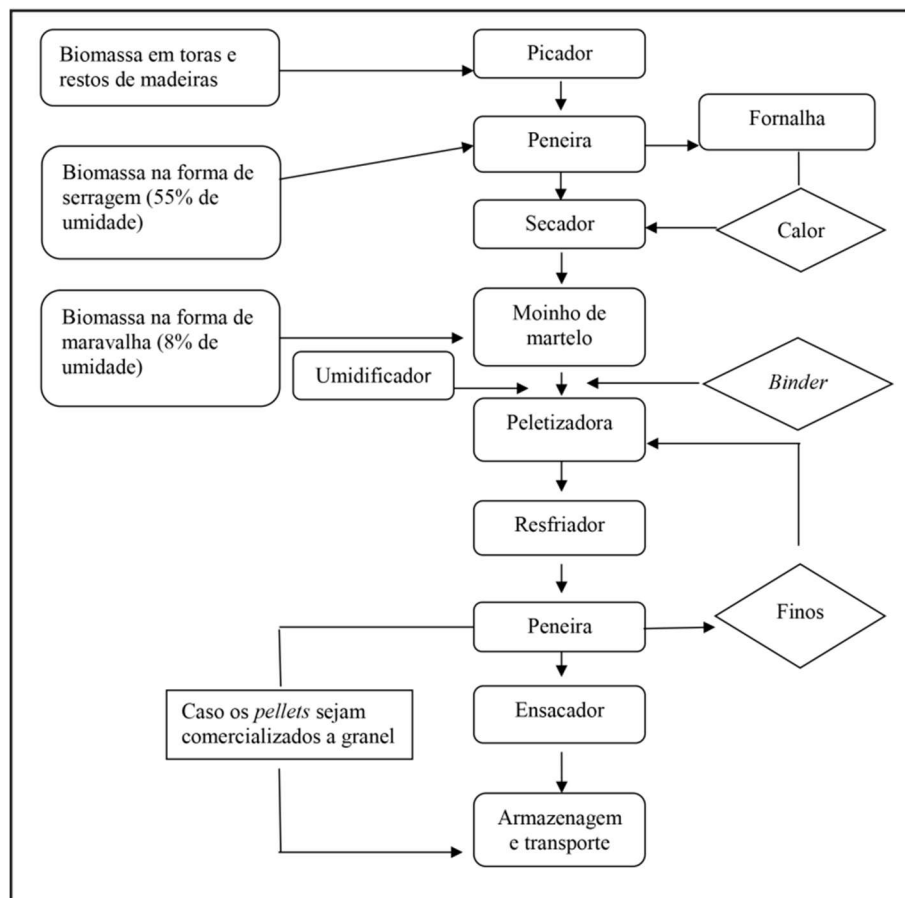
A biomassa pode ser originada de materiais lignocelulósicos, mas também podem ser oriundos da agropecuária, subprodutos de atividades agrícolas,

agroindustriais e da produção animal (EPE, 2025). Entretanto, as biomassas em sua forma natural possuem propriedades não uniformes, acarretando em dificuldades de manejo, estocagem e inconstância na eficiência energética (Anukam et al., 2021).

Os *pellets* são biocombustíveis sólidos compactados que vem ganhando espaço na utilização térmica, devido à sua alta densidade energética, tamanhos regulares e baixos teores de umidade, além de possuir facilidade de estocagem (Andriola, 2023). De acordo com Anukam et al. (2021), a peletização de biomassas agrega valor energético ao material, possibilita o aproveitamento de resíduos industriais, resulta em menor geração de poeiras, possui menores chances de ocasionar acidentes explosivos e suas características estão ligadas à densidade, composição do pellet, força e durabilidade.

O processo de peletização pode ser subdividido em oito etapas, sendo elas: armazenamento, limpeza, secagem, moagem, peletização, resfriamento, peneiração e distribuição (Quéno et al., 2019). (Figura 3)

Figura 3: Fluxograma simplificado do processo de peletização



Fonte: Quéno et al. (2019)

Algumas das vantagens dos pellets incluem o menor custo de manutenção das máquinas envolvidas no processo de produção, redução na emissão de fumaça, maior densidade energética e redução do teor de umidade (Silva, 2024). A possibilidade de peletizar resíduos oriundos da produção de carne, torna o processo atrativo para a peletização do lodo centrifugado gerado na agroindústria.

No estudo realizado por Silva (2024), a umidade encontrada para os *pellets* de lodo apresentou o valor de 4,87%. Em contrapartida, o lodo centrifugado, mesmo após os processos de cozimento e secagem, registrou umidade de aproximadamente 61% (Mantovan, 2022; Silva, 2024).

Desta forma, o beneficiamento do lodo centrifugado em pellets promove a otimização das propriedades do material. A sua aplicação em processos de combustão pode resultar em ganho de eficiência energética e na redução do consumo de cavaco, insumo que possui maior valor agregado

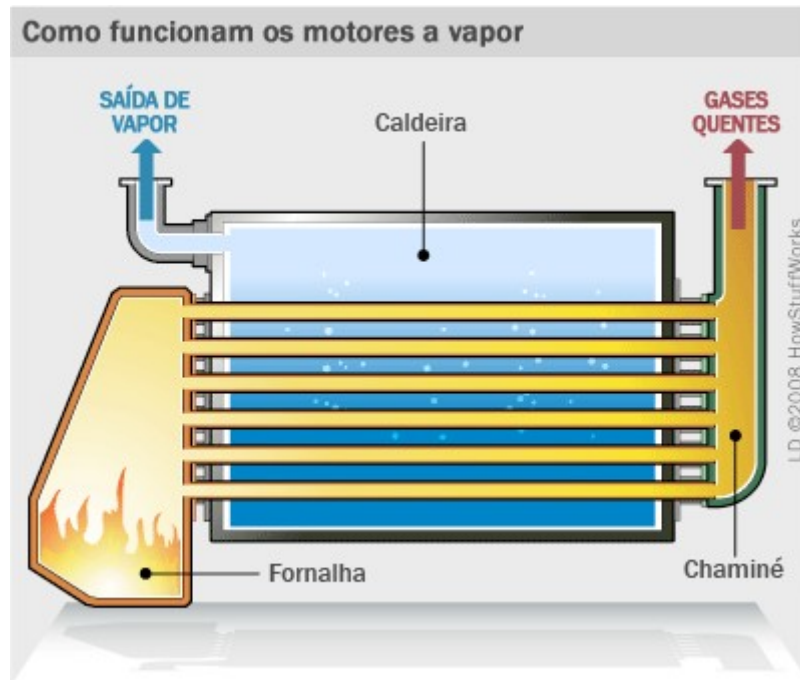
2.4 CALDEIRA

As unidades geradoras de vapor, chamadas de caldeiras, desempenham papel fundamental nos processos industriais ao fornecerem vapor para o aproveitamento da energia térmica. O vapor saturado é amplamente aplicado em setores como o de alimentos, bebidas e papel e celulose. A preferência pela água como fluido de trabalho justifica-se pelo seu elevado calor específico e pela ampla disponibilidade desse recurso no meio industrial (Bazzo, 1995).

No Brasil, a Norma Regulamentadora 13 (NR-13) estabelece os requisitos mínimos para a gestão da integridade desses equipamentos. O documento define caldeiras a vapor como "equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer forma de energia" (Brasil, 2022).

Em caldeiras flamotubulares, os gases quentes oriundos da combustão circulam no interior dos tubos, trocando calor com a água que os envolve. O fluxo dos gases quentes que percorrem o reservatório de água e vapor (balão), pode ser observado na Figura 4.

Figura 4: Fluxo dos gases quentes de combustão



Fonte: Clube do Vapor

Para a queima de biomassa sólida, um componente crítico é a fornalha, onde ocorre a conversão da energia química do combustível em calor. Segundo Bazzo (1995), a temperatura no interior da câmara de combustão varia tipicamente na faixa de 900 a 1400°C.

O desempenho desse processo é diretamente influenciado por parâmetros operacionais, como a injeção de ar (primário e secundário) e, no caso de caldeiras de grelha, a velocidade de movimentação das grelhas. Dessa forma, manter uma relação de operação estável e o controle dessas variáveis é mandatório para garantir a eficiência térmica e o atendimento da demanda de vapor da planta.

2.5 COMBUSTÃO

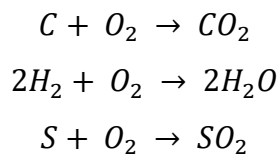
O processo de combustão é caracterizado por uma reação exotérmica rápida entre o combustível e oxidante, acompanhados da liberação de calor. Os principais elementos que participam das reações são carbono (C) e hidrogênio (H), acompanhados de outros elementos, como enxofre, nitrogênio e oxigênio, além de metais como vanádio e sódio em pequenas proporções (Junior et al. 2018).

Os combustíveis podem ser definidos como substâncias químicas que ao entrar em contato com um agente oxidante, podem produzir uma reação exotérmica, liberando energia na forma de calor. De acordo com Junior et al. (2018), se for possível descrever a reação de combustão por uma reação simples, esta pode ser representada por:

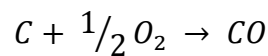


De acordo com Bazzo (1995), a energia liberada na combustão envolvendo combustíveis sólidos e líquidos é originada das reações químicas do carbono, hidrogênio e enxofre, como demonstrado nas reações a seguir.

Combustão completa:



Combustão incompleta:



A combustão completa é caracterizada como a reação ideal de combustão, ou seja, quando todo o carbono presente no combustível é oxidado para dióxido de carbono (CO₂). Entretanto, segundo Soares (1995), o processo real de combustão nunca será completo, resultando na liberação de materiais particulados, monóxido de carbono e outros gases considerados poluentes (apud Mantovan, 2022).

Junior; Lacava (2003) afirmam que os dispositivos que aproveitam a energia térmica proveniente das reações combustão, estão entre os maiores responsáveis por emissões de gases poluentes. O monóxido de carbono (CO), óxidos de enxofre (SO_x) e nitrogênio (NO_x) são considerados os maiores gases poluentes presentes nos gases de combustão, desta forma, avaliar as emissões gasosas é um passo crucial ao estudar diferentes composições de combustíveis.

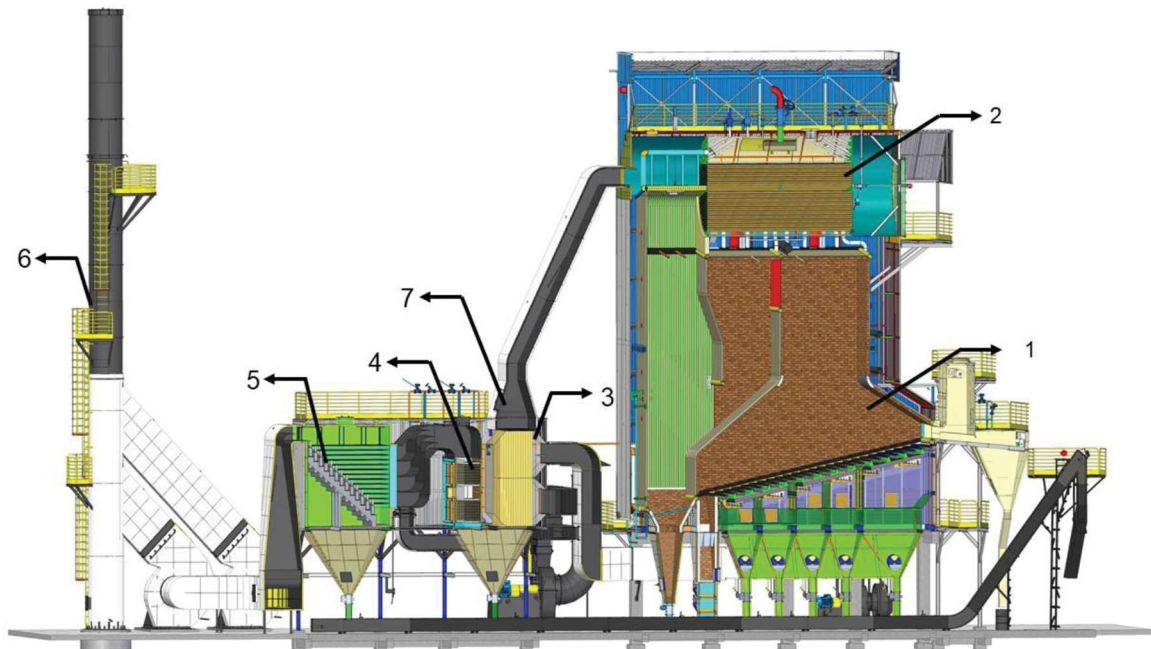
3 MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi desenvolvido com o apoio do Laboratório de Produção de Biocombustíveis (LPB) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) – Setor Palotina utilizando de dados obtidos no teste em campo em uma caldeira a biomassa de agroindústria local.

As características físico-químicas das biomassas foram obtidas a partir do levantamento bibliográfico, utilizando o estudo de Mantovan (2022) como referência.

Na Figura 5, está representada a unidade geradora de vapor onde os testes foram conduzidos, localizada em um complexo agroindustrial em Palotina – PR. Fornece vapor tanto para o frigorífico de aves e peixes, como para as plantas de termo processados e, eventualmente, a fábrica de rações que são instalas no mesmo complexo industrial. Projetada para fornecer 40 ton/h de vapor a 15 bar, a caldeira do tipo flamo tubular mista utiliza vapor saturado como fluido de trabalho e cavaco de eucalipto como principal combustível.

Figura 5: Representação esquemática da unidade geradora de vapor



Fonte: Cooperativa agroindustrial (2025)

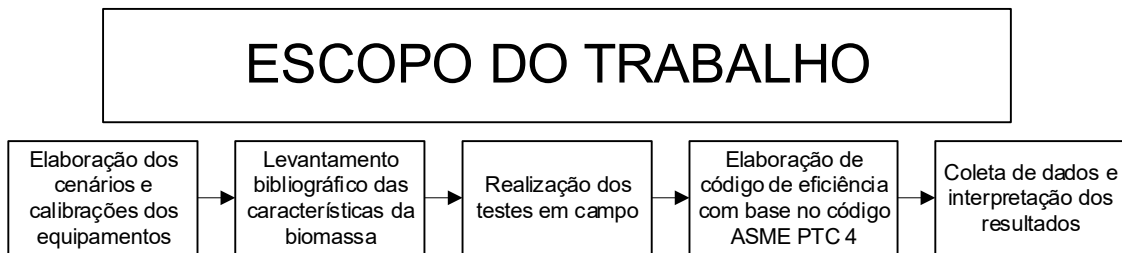
Para melhor visualização, a representação esquemática da unidade foi segmentada da forma: 1) Fornalha, 2) Caldeira, 3) Pré-aquecedor de ar, 4) economizador, 5) multiclone e 6) Chaminé.

3.1 ESCOPO DO TRABALHO

O trabalho foi estruturado com base no funcionamento da planta, de forma que possibilitasse a coleta dos dados necessários sem interferir no fornecimento e qualidade do vapor pela caldeira. Para aproveitar o espaço e tempo cedidos pela indústria, foi alinhado com o fornecedor dos *pellets* os dias corretos para a entrega do e realização dos testes.

Preliminarmente, elaborou-se um fluxograma simples com as etapas a serem desenvolvidas no trabalho.

Figura 6: Escopo do trabalho



Fonte: O autor (2025)

Os cenários foram elaborados a partir da massa disponível de *pellet* de lodo, possibilitando a execução das “corridas” com ao menos três cenários distintos, sendo eles:

- Corridas 1 e 2 (C1 e C2): Cenário de referência. Refere-se à condição atual de operação da caldeira, 15% de lodo centrifugado e 0% de *pellet*.
- Corrida 3 (C3): Adição de uma unidade do *bag* de *pellet* de lodo à carga de cavaco, resultando no teor de 3% em massa na mistura de combustíveis.
- Corrida 4 (C4): Adição de dois *bags* de *pellet* em uma carga de cavaco, resultando no teor de 6% em massa na mistura de combustíveis.

O principal objetivo é avaliar a possibilidade de incrementar o *pellet* de lodo ao procedimento de combustão já realizado na planta, ou seja, sem excluir a queima

de lodo centrifugado. Portanto propõe-se os cenários de testes integrando o *pellet* de lodo na mistura, utilizando de toda a massa disponível e elencando dois cenários distintos além da referência. Estes cenários podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1: Dosagem de *pellet* ao cavaco

Parâmetros	3% m <i>pellet</i> (C3)		6% <i>pellet</i> (C4)		Unidade
	Estabilização	Corrida	Estabilização	Corrida	
Carga de cavaco	18	18	18	18	Toneladas
Massa de lodo	3,2	3,2	3,2	3,2	Toneladas
Massa de <i>pellet</i>	0,6	0,6	1,3	1,3	Toneladas
Número de bags	1	1	2	2	Unidades
Tempo estimado consumo carga	2,6	2,6	2,8	2,8	Horas
Teor de <i>pellet</i> (massa)	3%	3%	6%	6%	Porcentagem
Teor de lodo (massa)	15%	15%	14%	14%	Porcentagem
Teor de resíduo (massa)	18%	18%	20%	20%	Porcentagem
Teor de <i>pellet</i> (energia)	6%	6%	12%	12%	Porcentagem
Teor de <i>pellet</i> (energia)	14%	14%	13%	13%	Porcentagem
Teor de resíduo (energia)	21%	21%	25%	25%	Porcentagem

FONTE: O autor (2025).

Após a esquematização do teste e recebimento do *pellet* produzido, o experimento foi levado para condução em campo. Conforme recomendado na ASME 4, cada rodada de teste foi dividida em duas etapas: a primeira para a equalização do sistema com determinada porção de combustível e a segunda para a coleta de dados no teste de queima. No caso das corridas C1 e C2 (cenário atual), foram realizadas em dois dias, com duração de 4 horas na etapa de estabilização e 4 horas de teste, já as corridas C3 e C4 em que são incrementadas as porções de *pellet*, foram conduzidas em um mesmo dia, utilizando de 3 horas para estabilização do sistema e 3 horas para a coleta de dados, totalizando em média 6 horas para cada corrida.

Por fim os dados foram incorporados no EES, software destinado a resolver diversas equações algébricas, possuindo propriedades termodinâmicas integradas ao sistema, permitindo equacionar de forma prática o teste realizado e auxiliando na expressão dos resultados. O equacionamento do problema pode ser observado no anexo 1.

3.2 BIOMASSAS UTILIZADAS

Para realizar o estudo de queima de uma biomassa, é necessário conhecer suas características físico-químicas, bem como o poder calorífico e umidade. Junior et. al (2018), caracterizam a combustão como uma reação exotérmica muito rápida

entre o combustível e oxidante, acompanhada da liberação de calor, sendo os compostos formados principalmente por carbono e hidrogênio considerados bons combustíveis.

Análise imediata é uma análise laboratorial, de acordo com padrão ASTM apropriado, de uma amostra de combustível fornecendo as porcentagens em massa de carbono fixo, matéria volátil, umidade e cinzas, enquanto a análise elementar fornece informações cruciais sobre a presença e concentração de elementos como carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre (Lima, 2024).

Para a estruturação deste trabalho, foram adotados os valores encontrados por Mantovan (2022). A partir do conhecimento das propriedades específicas da biomassa, é possível estimar a composição química do *pellet*, uma vez que o processo de peletização altera as propriedades físico-mecânicas conservando a propriedade química (Lima, 2024). Estas propriedades estão contidas na Tabela 2:

Tabela 2: Propriedades do cavaco e lodo em base seca

Parâmetro	Cavaco de Eucalipto	Lodo de ETE
Análise imediata¹		
Voláteis [%m, bs]	84,3	86,2
Cinzas [%m, bs]	0,6	6,8
Carbono fixo [%m, bs]	15,1	7,0
Análise elementar²		
Carbono [%m, bs]	46,7	54,4
Hidrogênio [%m, bs]	7,2	8,6
Oxigênio [%m, bs]	45,4	22,5
Nitrogênio [%m, bs]	0,02	6,8
Enxofre [%m, bs]	0,02	0,7
Cloro [%m, bs]	0,05	0,03
Poder Calorífico		
Superior (PCS) [kJ/kg, bs]	18.707	25.936

Fonte: ¹Adaptado de Mantovan (2022); ²LPB (2025)

A análise imediata das matérias-primas deve seguir os parâmetros descritos pelas normas aplicáveis às características analisadas (Lima, 2024). São elas:

- Teor de umidade – ASTM E-871-82

- Teor de cinzas – ASTM D-1102-84
- Carbono fixo – ASTM E-870-82

3.2.1 CAVACO DE EUCALIPTO

O principal combustível utilizado na unidade é o cavaco de madeira, proveniente de árvores de eucalipto, comercializado por fornecedores locais e também produzido por outras unidades da mesma cooperativa. Para manter uma relação de equiparidade, opta-se por utilizar apenas o cavaco disponibilizado pelo fornecedor interno, de forma a manter o mais próximo possível as características como umidade, granulometria, idade da madeira e outras passíveis de interferência no teste.

O cavaco é movimentado com o auxílio de uma pá carregadeira, que transporta o material do barracão até a moega de recepção. Esta, composta por duas roscas helicoidais, despeja o cavaco sobre a esteira de recepção, seguida pela correia principal, e, por fim, é transportado até o silo de alimentação da caldeira, que, através de gavetas dosadoras, movimenta a mistura de combustível até o alcance do primeiro estágio de grelhas.

Figura 7: Descarregamento de cavaco na unidade



Fonte: O autor (2025)

Uma alíquota é coletada e enviada ao LPB, onde foi realizada a medição do teor de umidade para o cálculo do PCI.

3.2.2 LODO CENTRIFUGADO

Após o processo de flotação, o lodo gerado passa por cozimento e aquecimento e é levado a um tridecanter, onde ocorre a separação das fases: óleo, clarificado e lodo centrifugado (Fagnani, 2017).

O lodo centrifugado resultante da etapa final de cozimento, é depositado em uma baia reservada propriamente isto, de forma que possibilite a retirada do material pela pá carregadeira. O operador, através da pá carregadeira faz a movimentação do lodo até a moega de dosagem, em que uma rosca sem fim, calibrada por inversor de frequência, despoja o material sobre a correia transportadora, assim resultando na mistura de combustíveis. A baia em que é depositada o lodo centrifugado, pode ser observada na Figura 8:

Figura 8: Baia de coleta de lodo



Fonte: O autor (2025)

Para determinar a vazão de lodo incrementada à mistura, fora levantada a média de lodo por concha, pesando na balança do frigorífico e cronometrado o tempo

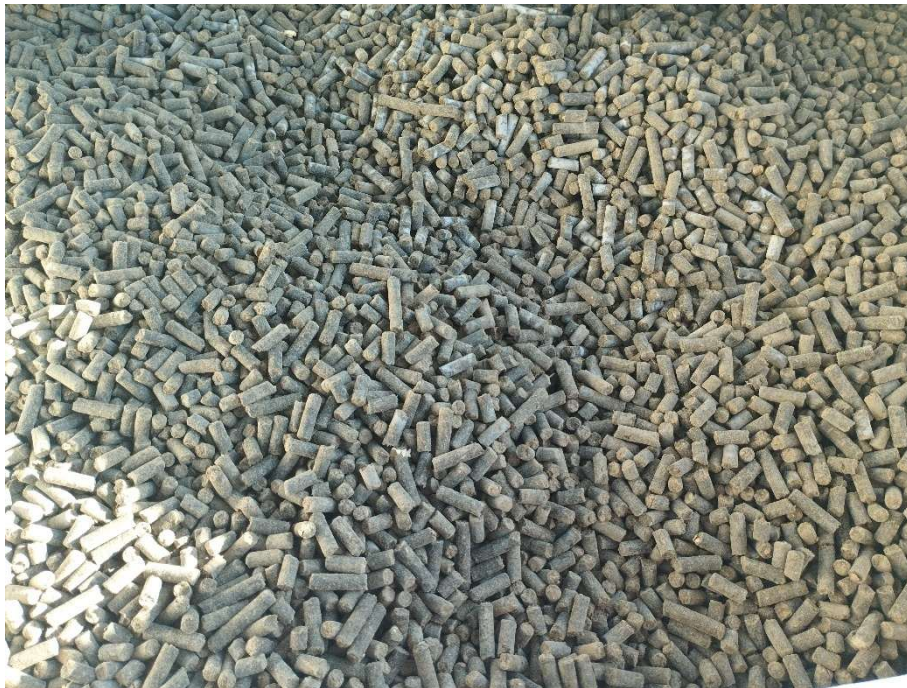
necessário para que a moega se esvaziasse por completo, mantendo a frequência do moto redutor em 65 Hz (frequência instaurada no processo). Como resultado, a vazão de lodo incrementada à mistura é de 0,5 kg/s.

Para determinar o Poder Calorífico do lodo também é necessário conhecer as características e teores de umidade. Estes valores foram determinados por Mantovan (2022) e podem ser encontrados na Tabela 2, na seção 3.2.

3.2.3 PELETIZAÇÃO DO LODO

O fornecedor responsável pela peletização do lodo, está localizado no município de Toledo, a aproximadamente 75km de distância do frigorífico. Dessa forma, a estimativa da economia de cavaco será realizada com base na quantidade de lodo enviado para a produção de *pellet*, considerando que todo este material será queimado na caldeira.

Figura 9: *Pellet* de lodo



Fonte: O autor (2025)

A parcela de lodo a ser peletizada foi separada e encaminhada ao fornecedor especializado em produção de *pellets*, retornando após o processamento, em Bags de aproximadamente 640 kg cada utilizados nos testes. O total de 4.480 kg foram

disponibilizados para o teste, permitindo a elaboração de ao menos dois cenários de teste.

3.3 ANÁLISE DO DESEMPENHO DA UNIDADE

3.3.1 Teor de umidade e PCI

Com o objetivo de determinar os resultados com maior precisão, a medição de umidade foi realizada em alíquotas coletadas durante a execução dos testes. A amostragem dos materiais foi realizada pelo método de quarteamento manual (Meyer et al. 2024) e destinado para determinação de umidade no LPB.

Para a determinação da umidade do material, foi utilizada a normativa 14929 (ABNT, 2017), que trata da determinação do teor de umidade pelo método de secagem em estufa. Neste método, utiliza-se um béquer previamente pesado e posteriormente adiciona-se a massa do material. Logo após, é conduzido para a estufa onde permanecerá por 24 horas à temperatura de 105°C, por fim, realizada a pesagem final. Com a obtenção destas massas é possível determinar a umidade da amostra a partir da equação 3.

$$U = \frac{M_i - M_s}{M_s} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

- U [kg.kg⁻¹]: Teor de umidade em base seca;
- M_i [kg]: Massa inicial;
- M_s [kg]: Massa seca

Com o teor de umidade quantificado, o Poder Calorífico Inferior (PCI) dos combustíveis, parâmetro empregado no cálculo da eficiência térmica e consumo de combustível da unidade geradora de vapor, foi calculado a partir do PCS dos mesmos, conforme Eq. :

$$PCI = PCS - 2440 (9H + U) \quad \text{Eq. 2}$$

Onde U [kg/kg] representa a umidade do material, H [kg/kg] o teor de hidrogênio do material em base úmida, PCS [kJ/kg] o poder calorífico superior do

material convertido para base úmida e PCI [kJ/kg] o poder calorífico inferior em base úmida.

3.3.2 Eficiência térmica de combustão

O código ASME PTC 4 discorre sobre procedimentos para realização de testes de desempenho em geradores de vapor a base de combustível, fornecendo padrões de ensaios consistentes e confiáveis que possibilitam alcançar resultados precisos se aplicados corretamente (ASME, 2008).

Devido à variabilidade do combustível, ao ajuste do sistema e a outros fatores, variações nos parâmetros de operação são inevitáveis. Neste sentido, para minimizar as incertezas, as medições dos parâmetros serão realizadas em intervalos de 15 minutos, conforme especificado na seção 3-2.6.4 do código ASME.

O balanço de energia é o método de quantificação de eficiência preferido e recomendado para determiná-la. De modo direto, a eficiência de um sistema pode ser definida como a relação entre a produção de energia (vapor) e a entrada de energia (combustível), na forma de entrada-saída, expressa como uma porcentagem.

$$Eficiência = \frac{Saída}{Entrada} * 100 [\%] \quad Eq. 3$$

Ao desenvolver a equação considerando as características da combustão e da energia produzida, a eficiência de combustão é determinada pela quantificação da energia retirando as frações associadas a perdas, dessa forma, o método de eficiência por perdas é descrito na equação 3:

$$\eta = \left[1 - \left(\frac{q_{gc} + q_{CO} + q_{cz} + q_{cnq} + q_{cp} + q_{pur}}{q_{disp}} \right) \right] * 100\% \quad Eq.4$$

Onde:

- η [%]: é a eficiência da unidade geradora de vapor;
- q_{gc} [kJ/kg]: energia perdida pelos gases na chaminé por quilograma de combustível queimado;
- q_{co} [kJ/kg]: energia perdida pela emissão de monóxido de carbono por quilograma de combustível queimado;

- q_{cz} [kJ/kg]: energia perdida junto às cinzas por quilograma de combustível queimado;
- q_{cnq} [kJ/kg]: energia perdida pelo carbono não queimado presente no material cinzeiro da caldeira por quilograma de combustível queimado;
- q_{cp} [kJ/kg]: energia perdida por radiação e convecção pelas superfícies da caldeira por quilograma de combustível queimado;
- q_{pur} [kJ/kg]: energia perdida pelas purgas da caldeira por quilograma de combustível queimado; e,
- q_{disp} [kJ/kg]: energia disponível na fornalha por quilograma de combustível queimado.

3.3.3 Medição dos gases de combustão

As frações de CO, NOx e SOx expressos em [mg/Nm³ @ 7% O₂], foram medidos por meio de equipamento calibrado, estes valores serão avaliados em relação a resolução SEMA 16.

As medições foram realizadas através do equipamento Testo 340, que foi introduzido no orifício destinado para amostragem localizado nos dutos de gases entre o trapézio da caldeira e o pré-aquecedor de ar. Este equipamento, analisa as emissões gasosas através de células eletroquímicas.

O excesso de ar foi calculado através da equação 5 (Bazzo, 1995):

$$e = \frac{\%O_2}{21 - \%O_2} \quad \text{Eq.5}$$

Para o cálculo dos limites normativos, considerando a mistura de resíduos, foi empregada a média ponderada dos limites normativos para a queima de derivados da madeira e para incineração, considerando a contribuição energética de cada combustível na queima.

3.4 TEMPERATURA DE ORVALHO DO H₂SO₄

Para análise da tendência ao desenvolvimento de corrosão em zonas de baixa temperatura da caldeira foi calculada a temperatura de orvalho do H₂SO₄ para cada corrida, conforme relação empírica estabelecida por (Retschitzegger; Brunner; Obernberger, 2015):

$$\frac{1000}{T_{dp}} = 2,276 - 0,02943 \cdot \ln(p_{H_2O}) - 0,0858 \cdot \ln(p_{SO_3}) + 0,0062 \cdot \ln(p_{H_2O}) \cdot \ln(p_{SO_3}) \quad \text{Eq.6}$$

Onde, T_{dp} [K] é a temperatura de orvalho do H_2SO_4 ; e p_i [mmHg] e a pressão parcial do componente i nos gases de combustão.

Quanto maior a temperatura de orvalho, maior a propensão ao desenvolvimento de corrosão em zonas de baixa temperatura da caldeira, como o pré-aquecedor de ar, o multiclone e a chaminé. Desta forma, é essencial fazer o levantamento deste parâmetro para identificar se a adição do combustível contribuirá para um aumento da exposição à corrosão dos equipamentos.

3.5 ESTIMATIVA DE ECONOMIA DE CAVACO

Para avaliar a economia de cavaco com o incremento do teor de *pellet* de lodo, foram realizados balanços de massa e de energia na caldeira, considerando as características dos combustíveis envolvidos e as condições operacionais. Serão levados em considerações: o regime de trabalho da caldeira, vazão mássica dos combustíveis, teor de umidade do cavaco, lodo e *pellet*.

Para vislumbrar o potencial de redução no consumo de cavaco, será avaliado o cenário em que todo o lodo excedente (15 t/dia) será enviado para a peletização, e conseqüentemente queimado na caldeira.

Para estabelecer esta relação, foram calculadas a participação em energia de cada combustível, para poder quantificar o quanto de energia, antes disponibilizada pelo cavaco é suprida pelo *pellet* de lodo. A partir da distribuição energética de cada componente, foi determinada sua parcela em massa através da correlação exposta na Equação 7.

$$\dot{m} = \frac{E_c}{PCI_c} \quad \text{Eq.7}$$

Onde:

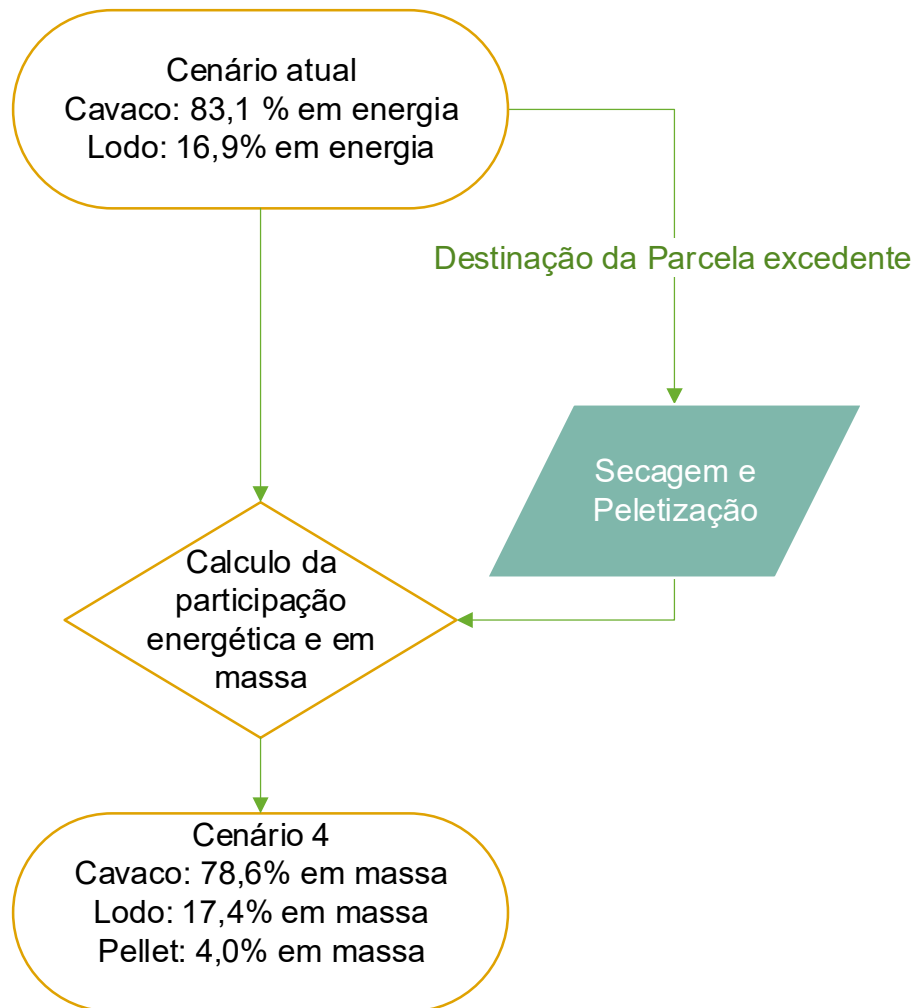
\dot{m} [t/dia] = Vazão mássica do combustível por dia;

E_c [MJ/dia] = Teor em energia do combustível por dia;

PCI_c [kJ/kg] = Poder Calorífico Inferior do combustível.

O fluxo desta quantificação pode ser observado na Figura 10.

Figura 10: Fluxo da quantificação da participação dos combustíveis



Fonte: O autor (2025)

A partir desta etapa, é possível estabelecer uma relação comparativa entre o cenário inicial e final, demonstrando a diminuição consumo de cavaco em função do aumento de teor de *pellet* na mistura.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1 TEOR DE UMIDADE DAS BIOMASSAS

O teor de umidade, quantificado pelo método de estufa com base na NBR 14929, foi calculado utilizando as diferenças de massas entre o material antes e após o processo de secagem por 24 horas.

A alíquota coletada *in loco* durante os experimentos, foi encaminhada ao LPB para execução da análise e os resultados são observados na Tabela 3.

Tabela 3: Teor de umidade dos combustíveis

Combustível	C1 (0% pellet)	C2 (0% pellet)	C3 (3% pellet)	C4 (6% pellet)	Lima (2024) (95% lodo)	Andriola (2023) (100% lodo)
Cavaco	41,30%	46,10%	36,60%	36,20%	-	-
Lodo	54,60%	57,30%	51,80%	54,20%	61,74%	-
Pellet	-	-	2,90%	4,20%	4,87%	4,20%

Fonte: O autor (2025)

O teor de umidade corrobora com os resultados encontrados nos trabalhos de referência. Lima (2024) trabalhou com uma proporção de 95% lodo centrifugado e 5% amido de mandioca, enquanto Andriola (2023) realizou a caracterização do *pellet* composto totalmente de lodo.

O baixo valor de umidade representa um grande aumento na densidade energética do material, resultando em um poder calorífico superior na mistura total de combustíveis. Desta forma, espera-se obter melhor eficiência com o emprego deste material mais seco.

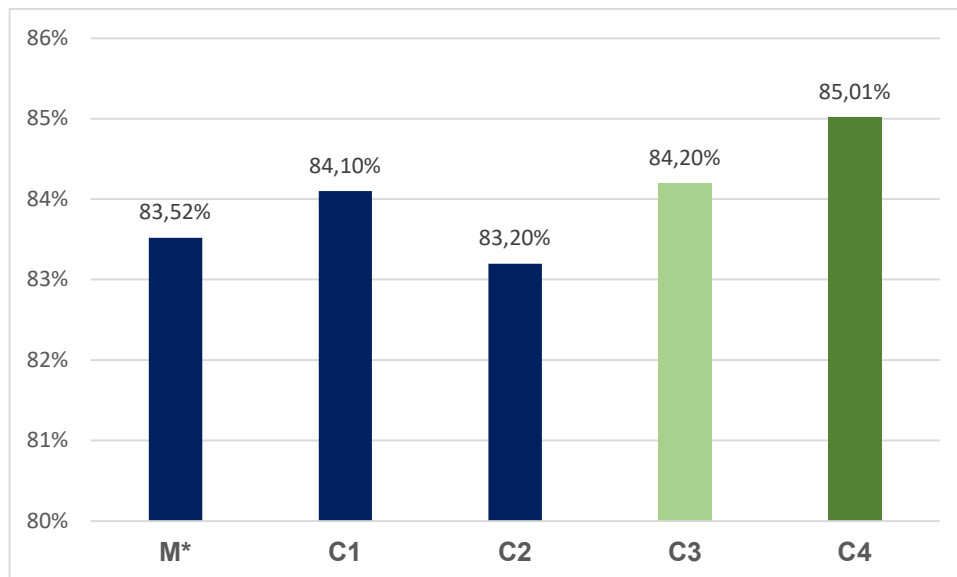
4.2 EFICIÊNCIA TÉRMICA DA UNIDADE GERADORA DE VAPOR

Durante as corridas, a temperatura da saída de gases na chaminé permaneceu em média, por volta de 175°C. Bazzo (1995) estabelece que a temperatura dos gases de combustão pode variar de 120 a 300°C e são importantes para quantificação de perdas pelos gases de combustão, desta forma o valor encontrado está de acordo com os limites descritos. Mantovan (2022) encontrou o valor estabilizado de 160°C durante os testes com cenários semelhantes, denotando

resultado um pouco abaixo do medido, porém dentro da faixa média identificada neste trabalho.

A eficiência térmica da caldeira foi determinada segundo as equações do método das perdas. O código contendo as equações, estruturado no software EES pode ser encontrado de forma detalhada no apêndice 1. No Gráfico 1, estão elencados os valores de eficiência obtidos nos testes, em comparação com o valor encontrado no trabalho de Mantovan et al. (2021). O valor obtido pela autora corresponde ao teste que fora realizado nas mesmas condições de operação das corridas C1 e C2 (15%*m/m* lodo e 0%*m/m pellet*).

Gráfico 1 – Eficiência térmica da caldeira



*Nota: Mantovan et al., (2021)

FONTE: O autor (2025)

A correlação descreve um comportamento de aumento da eficiência com o incremento de teor de *pellets* de lodo e conseqüentemente, redução da umidade. A umidade no blend de combustível implica em um desfavorecimento do processo de combustão, uma vez que os vapores de água gerados no interior da fornalha reduzem o potencial calorífico da queima, ocasionando menor absorção desta energia pelo vapor a ser gerado no balão.

A compactação do material também contribui para a constância dos resultados, o pellet possui a tendência de se espalhar mais uniformemente sobre os grelhados em comparação com o lodo centrifugado.

Pode se concluir que a substituição do cavaco por pellet de lodo, ocasiona uma tendência de elevação da eficiência térmica devido principalmente ao baixo teor de umidade no material. Entretanto, o acréscimo é relativamente pequeno, por volta de 2%, permanecendo na faixa de erro adotadas em estudos científicos. Para confirmar este resultado, torna-se necessário estudar cenários mais amplos e determinar uma distribuição representativa do beneficiamento térmico em função do incremento de *pellet* de lodo.

4.3 MEDIÇÃO DOS GASES

O teor de oxigênio medido na chaminé se manteve na média de 8%/v, correspondendo a 62% de excesso de ar. A faixa recomendada por Bazzo (1995) utilizando madeira como combustível é de 30 a 60% de excesso de ar, neste caso o valor encontrado está um pouco acima do especificado.

No decorrer dos testes foram medidas as emissões de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x) e de enxofre (SO_x). Os valores obtidos são elencados em comparação com os limites de emissão especificados pela resolução SEMA 16 (SEMA, 2014), que são descritos de acordo com um valor percentual de referência de oxigênio nos gases. Desta forma, para expressar e comparar os resultados, é necessário corrigir as concentrações medidas pelo equipamento para o valor de referência de 7% de O₂. Além disso, no caso de mistura de combustíveis, os padrões de emissão podem ser calculados a partir de uma média em função da respectiva energia fornecida para a geração de calor (SEMA, 2014). Com isto, os limites para as emissões foram estabelecidos de acordo com as premissas de NO₂: 5% do Nox (volume) e SO₃: 3% do SO_x (volume) em relação ao cenário C4.

Na Tabela 4 podem ser observadas as emissões gasosas durante a realização dos testes.

Tabela 4: Emissões gasosas dos testes

	C1	C2	C3	C4	Limites	Mantovan
Parâmetros	(0% <i>pellet</i>)	(0%<i>pellet</i>)	(3% <i>pellet</i>)	(6% <i>pellet</i>)	(SEMA, 2014)	(2022)
Teor em Energia [%]	15	15	21	26	20	15
CO [mg/Nm ³]	3	2	1	5	1069	9

NO _x [mg/Nm ³]	164	194	208	170	664	142
SO _x [mg/Nm ³]	58	96	159	194	280	13

FONTE: O autor (2025)

Observou-se que a emissão de CO apresentou valores extremamente baixos em todos os experimentos, indicando boa eficiência na queima dos gases combustíveis (voláteis) liberados na fornalha. Além dos valores baixos, não foi identificada uma tendência de elevação do teor CO com o aumento da dosagem de *pellet*, assim demonstrando que o combustível não contribuiria com a emissividade deste gás.

Apesar de maior concentração de nitrogênio no lodo ser maior do que a encontrada para o cavaco, o aumento na emissão de NO_x não foi tão expressiva e se manteve bem abaixo do limite especificado. Já para as emissões de SO_x, foi identificado um aumento considerável com o incremento do *pellet* de lodo na mistura, fator associado ao maior teor de enxofre presente no lodo em comparação ao cavaco.

O teor de NO_x se manteve abaixo do encontrado na referência, enquanto os valores de CO e SO_x se mantiveram acima. Observa-se grande variação do teor de óxidos de enxofre em comparação com o de Mantovan (2022), ressaltando a variabilidade das características do efluente da agroindústria e o impacto do incremento de *pellet*.

4.4 PROPENSÃO À CONDENSAÇÃO DE H₂SO₄

As estimativas para a temperatura de orvalho do H₂SO₄ presente nos gases de combustão foram calculadas de acordo com os cenários de queima, sendo eles cavaco puro, cavaco + 15% de lodo centrifugado e com as adições de 3% e 6% em massa de *pellet* de lodo na mistura, respectivamente.

As temperaturas encontram-se na Tabela 5, levando em consideração a umidade do cavaco de 40% e o excesso de ar de 60%.

Tabela 5 – Temperatura de pontos de orvalho para o lodo centrifugado e *pellet* de lodo

Parâmetro	Cavaco Puro	0% <i>pellet</i>	3% <i>m pellet</i>	6% <i>m pellet</i>
Teor de Resíduo [%e]	0%	15%	21%	25%
Temp. orvalho H ₂ SO ₄	115°C	128°C	129°C	131°C

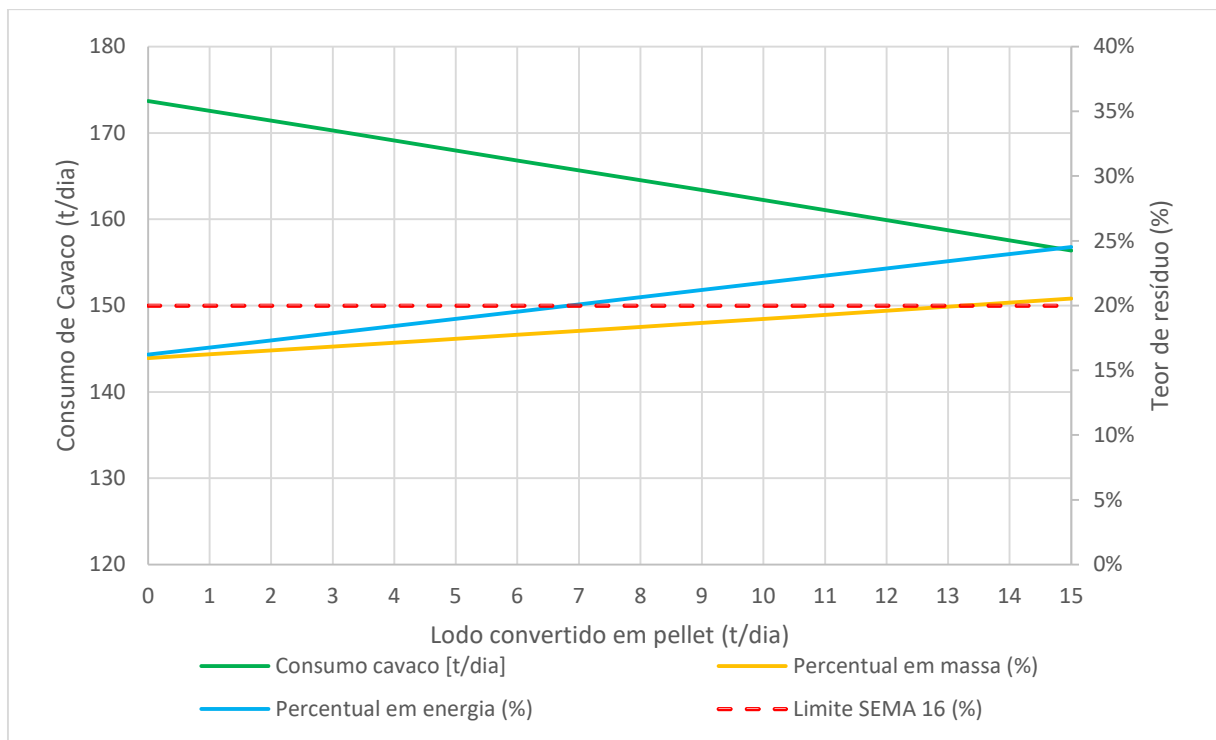
FONTE: O autor (2025).

Nota-se um aumento expressivo na temperatura de orvalho na transição do cenário de cavaco puro para o que contém 15% de lodo centrifugado (cenário de operação atual). Entretanto, ainda que a adição de *pellet* à mistura indique um aumento do teor de enxofre no combustível, este não se traduz em ganho significativo na temperatura de condensação. Este fato se deve ao baixo teor de umidade, característica importante para a obtenção do H_2SO_4 .

4.5 ESTIMATIVA DE ECONOMIA DE CAVACO

Os balanços de massa e energia avaliados nos testes são apresentados no Gráfico 2, em função da quantidade de lodo enviado para peletização, considerando que todo o *pellet* produzido será queimado na caldeira da unidade.

Gráfico 2: Balanço de massa e energia



FONTE: O autor (2025)

Observa-se que o limite de 20% em energia estabelecido pela SEMA 42/08 é atingido quando são enviadas 6 toneladas de lodo para peletização, resultando em uma economia de 7 t/dia de cavaco (redução de 4%), devido à substituição parcial

pelo *pellet*. No caso de toda o lodo centrifugado disponível seja peletizado e consequentemente queimada na caldeira, o limite tanto em energia, quanto em massa seria ultrapassado, porém o consumo de cavaco seria diminuído em 10%, representando na redução de 17 t/dia.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os testes demonstraram que a queima do *pellet* de lodo na caldeira pode ser tecnicamente viável, com queima satisfatória nos cenários testados, sem acarretar problemas operacionais ou instabilidades significativas.

A substituição parcial de cavaco por *pellet* de lodo apresentou influência positiva na eficiência térmica da unidade, principalmente devido ao baixo teor de umidade do material, que favorece uma combustão mais eficiente.

As emissões atmosféricas de CO, NO_x e SO_x se mantiveram dentro dos limites estabelecidos pela Resolução SEMA 16/14. Entretanto, foi identificado aumento na concentração de SO_x com o aumento de teor de *pellets*.

Importante destacar que apesar dos valores encontrados serem satisfatórios, o incremento de mais de 3% de *pellet* em massa na mistura de cavaco e lodo centrifugado excede o limite de 20% em energia estipulado pela Resolução SEMA 42/08. Desta forma, para implementar oficialmente este cenário, será necessário obter licença ambiental ou autorização dos órgãos competentes.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se avaliar a possibilidade peletizar todo o lodo queimado atualmente na caldeira, de forma a reduzir consideravelmente a umidade do combustível e ampliar as possibilidades de destinação do resíduo.

Estudar a implementação uma unidade de peletização na propriedade industrial, evitando imprevistos com terceiros, assumindo o controle da produção de *pellets* e reduzindo custos com fretes e mão de obra.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA PISCICULTURA. **Anuário Brasileiro da Piscicultura 2025**. São Paulo, 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14929**: Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL (ABPA). **Relatório anual 2025**. 2025. Disponível em: <https://abpa-br.org/wp-content/uploads/2025/04/ABPA.-Relatorio-Anual-2025.pdf>. Acesso em: 29 set. 2025.
- BAZZO, E. **Geração de vapor**. 2.ed. rev. ampl. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1995.
- CLUBE DO VAPOR. Geração de vapor, 2010. Disponível em: <<https://clubedovapor.blogspot.com/2010/08/producao-de-vapor.html>>. Acesso em: 24/11/2025.
- EMBRAPA. Uso da Biomassa para a Geração de Energia. **Embrapa Tabuleiros Costeiros**. Aracaju, 2016. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1063559/1/Doc211.pdf>>. Acesso em: 18/11/2025
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional 2025: Ano base 2024**. Rio de Janeiro, 2025. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2025>>. Acesso em: 04/12/2025.
- FIGUEIREDO, E. A. P. D., SCHMIDT, G. S., AVILA, V. S. D., JAENISCH, R. F., PAIVA, D. P. D.; Recomendações técnicas para a produção, abate, processamento e comercialização de frangos de corte coloniais; **Embrapa Suínos e Aves**; Sistemas de Produção, nº 3, 2007;
- JUNIOR, J. A. C.; ZEVALLOS, A. A. M. RODRIGUEZ, C. J. C.; MCQUAY, M. Q. **Combustão Aplicada**. Editora da UFSC. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2018.
- JUNIOR, J. A. C.; LACAIVA, P. T. **Emissões em processos de combustão**. Editora UNESP. São Paulo, 2023. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=D0-BJo0yi4wC&lpg=PA7&ots=UxRjuEtcJb&dq=combust%C3%A3o&hl=pt-BR&pg=PA4#v=onepage&q&f=false>>. Acesso em: 24/11/2025.
- SANTOS, G. H. F.; NASCIMENTO, R. S.; ALVES, G. M. Biomassa como energia renovável no Brasil. **Revista UNINGÁ**. Maringá, 2017.
- SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS, GOVERNO DO PARANÁ (SEMA). **Resolução nº 16/14**. Padrões de Emissão Atmosférica para Fontes Estacionárias, 2014.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS, GOVERNO DO PARANÁ (SEMA). **Resolução nº 42/08**. Critérios para a queima de resíduos em caldeiras e outras providências, 2008.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Biomassa: resíduos que são transformados em energia. **Governo Federal**. Disponível em: < <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/biomassa-residuos-que-sao-transformados-em-energia>>. Acesso em: 24/11/2025.

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

MANTOVAN, F. M.; TELEKEN, J. G.; OLIVEIRA, A. F.; BURIN, E. L. K.; BAZZO, E.; WELTER, R.; ZAPALAI, C. G. Effects of corrosion incidence on a biomass steam generator unit: a case study. *In*: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA (COBEM)**, 2021.

MEYER, M. F.; BARROS, J. C.; CHAVES, J. M. P.; SILVA, J. P. P. D. INFLUÊNCIA DO MÉTODO DE QUARTEAMENTO NA REPRESENTATIVIDADE DAS ALÍQUOTAS DE ROCHAS/MINÉRIO. **Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia (CONTECC)**, 2024.

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.

RETSCHITZEGGER, Stefan; BRUNNER, Thomas; OBERNBERGER, Ingwald. Low-Temperature Corrosion in Biomass Boilers Fired with Chemically Untreated Wood Chips and Bark. **Energy & Fuels**, v. 29, p. 3913–21, 2015.

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

ANEXO 1 – EQUAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE COMBUSTÃO (.EES)

"!Funções"

Function h_cz(T_cz)

If (T_cz > 727) Then

$$h_{cz} := (0,1822637E2 + 0,3606155E-1*(T_{cz}+273) + 0,4325735E-3*(T_{cz}+273)^2 - 0,1984149E-6*(T_{cz}+273)^3 + 0,4839543E-10*(T_{cz}+273)^4 - 0,4614088E-14*(T_{cz}+273)^5) * \text{convert}(\text{Btu/lbm};\text{kJ/kg}) \text{ "kJ/kg}"$$

Else

$$h_{cz} := (-0,3230338E2 - 0,2431404E0*(T_{cz}+273) + 0,1787701E-2*(T_{cz}+273)^2 - 0,2598230E-5*(T_{cz}+273)^3 + 0,2054892E-8*(T_{cz}+273)^4 - 0,6366886E-12*(T_{cz}+273)^5) * \text{convert}(\text{Btu/lbm};\text{kJ/kg}) \text{ "kJ/kg}"$$

Endif

End

"!Condições de referência para o problema"

T_0 = 25 [C] "Temperatura de bulbo seco"

p_0 = 1 [bar] "Pressão de referência"

ur_0 = 0,6 "Umidade relativa de referência"

"!Condições do ambiente"

{T_amb = 25 [C] "Temperatura de bulbo seco no dia do experimento"}

p_amb = 1 [bar] "Pressão do ambiente no dia do experimento"

ur_amb = 0,3 "Umidade relativa [0:1]"

omega_amb=humrat(AirH2O;T=T_amb;R=ur_amb;P=p_amb) "quantidade de vapor por kg de ar seco de admissão [kg_H2O/kg_ar_seco]"

v_arO2 = 0,2095 [kmol/kmol]

v_arN2 = 0,7905 [kmol/kmol]

m_arO2 = 0,2314 [kg/kg]

m_arN2 = 0,7686 [kg/kg]

"Calor latente da água"

$h_{\text{vap_H2O}}=2442$ [kJ/kg]

"!Lodo"

"Ultimate analysis (db)"

$H_{\text{lodo_db}} = 0,0863$ [kg/kg]

$C_{\text{lodo_db}} = 0,5444$ [kg/kg]

$O_{\text{lodo_db}} = 0,2247$ [kg/kg]

$N_{\text{lodo_db}} = 0,0676$ [kg/kg]

$S_{\text{lodo_db}} = 0,0067$ [kg/kg]

$Cl_{\text{lodo_db}} = 0,0003$ [kg/kg]

"Proximate analysis (db)"

$CFixed_{\text{lodo_db}}=0,0677$ [kg/kg]

$Vol_{\text{lodo_db}}=0,8620$ [kg/kg]

$Cz_{\text{lodo_db}}=0,0703$ [kg/kg]

$H2O_{\text{lodo}} = 0,542$ [kg/kg]

"Heating value, db"

$PCS_{\text{lodo_db}}=25936$ [kJ/kg]

"Ultimate analysis (raw)"

$H_{\text{lodo}}=H_{\text{lodo_db}}*(1-H2O_{\text{lodo}})$

$C_{\text{lodo}}=C_{\text{lodo_db}}*(1-H2O_{\text{lodo}})$

$O_{\text{lodo}}=O_{\text{lodo_db}}*(1-H2O_{\text{lodo}})$

$N_{\text{lodo}}=N_{\text{lodo_db}}*(1-H2O_{\text{lodo}})$

$S_{\text{lodo}}=S_{\text{lodo_db}}*(1-H2O_{\text{lodo}})$

$Cl_{\text{lodo}}=Cl_{\text{lodo_db}}*(1-H2O_{\text{lodo}})$

"Proximate analysis (raw)"

$CFixed_{\text{lodo}}=CFixed_{\text{lodo_db}}*(1-H2O_{\text{lodo}})$

$Vol_{\text{lodo}}=Vol_{\text{lodo_db}}*(1-H2O_{\text{lodo}})$

$Cz_{\text{lodo}}=Cz_{\text{lodo_db}}*(1-H2O_{\text{lodo}})$

$$\text{PCS_Iodo} = \text{PCS_Iodo_db} * (1 - \text{H2O_Iodo})$$

$$\text{PCS_Iodo} = \text{PCI_Iodo} + h_vap_H2O * (9 * \text{H_Iodo} + \text{H2O_Iodo})$$

"!pellet"

"Ultimate analysis (db)"

$$\text{H_pellet_db} = 0,0863 \text{ [kg/kg]}$$

$$\text{C_pellet_db} = 0,5444 \text{ [kg/kg]}$$

$$\text{O_pellet_db} = 0,2247 \text{ [kg/kg]}$$

$$\text{N_pellet_db} = 0,0676 \text{ [kg/kg]}$$

$$\text{S_pellet_db} = 0,0067 \text{ [kg/kg]}$$

$$\text{Cl_pellet_db} = 0,0003 \text{ [kg/kg]}$$

"Proximate analysis (db)"

$$\text{CFixed_pellet_db} = 0,0677 \text{ [kg/kg]}$$

$$\text{Vol_pellet_db} = 0,8620 \text{ [kg/kg]}$$

$$\text{Cz_pellet_db} = 0,0703 \text{ [kg/kg]}$$

$$\text{H2O_pellet} = 0,042 \text{ [kg/kg]}$$

"Heating value, db"

$$\text{PCS_pellet_db} = 25936 \text{ [kJ/kg]}$$

"Ultimate analysis (raw)"

$$\text{H_pellet} = \text{H_pellet_db} * (1 - \text{H2O_pellet})$$

$$\text{C_pellet} = \text{C_pellet_db} * (1 - \text{H2O_pellet})$$

$$\text{O_pellet} = \text{O_pellet_db} * (1 - \text{H2O_pellet})$$

$$\text{N_pellet} = \text{N_pellet_db} * (1 - \text{H2O_pellet})$$

$$\text{S_pellet} = \text{S_pellet_db} * (1 - \text{H2O_pellet})$$

$$\text{Cl_pellet} = \text{Cl_pellet_db} * (1 - \text{H2O_pellet})$$

"Proximate analysis (raw)"

$$\text{CFixed_pellet} = \text{CFixed_pellet_db} * (1 - \text{H2O_pellet})$$

$$\text{Vol_pellet} = \text{Vol_pellet_db} * (1 - \text{H2O_pellet})$$

$Cz_pellet = Cz_pellet_db * (1 - H2O_pellet)$
 $PCS_pellet = PCS_pellet_db * (1 - H2O_pellet)$
 $PCS_pellet = PCI_pellet + h_vap_H2O * (9 * H_pellet + H2O_pellet)$

"!Cavaco"

"Ultimate analysis (db)"

$H_cavaco_db = 0,072$ [kg/kg]
 $C_cavaco_db = 0,47$ [kg/kg]
 $O_cavaco_db = 0,45$ [kg/kg]
 $N_cavaco_db = 0,0002$ [kg/kg]
 $S_cavaco_db = 0,0002$ [kg/kg]
 $Cl_cavaco_db = 0,0005$ [kg/kg]

"Proximate analysis (db)"

$CFixed_cavaco_db = 0,15$ [kg/kg]
 $Vol_cavaco_db = 0,84$ [kg/kg]
 $Cz_cavaco_db = 0,005$ [kg/kg]

$H2O_cavaco = 0,362$ [kg/kg]

"Heating value, db"

$PCS_cavaco_db = 18707$ [kJ/kg]

"Ultimate analysis (raw)"

$H_cavaco = H_cavaco_db * (1 - H2O_cavaco)$
 $C_cavaco = C_cavaco_db * (1 - H2O_cavaco)$
 $O_cavaco = O_cavaco_db * (1 - H2O_cavaco)$
 $N_cavaco = N_cavaco_db * (1 - H2O_cavaco)$
 $S_cavaco = S_cavaco_db * (1 - H2O_cavaco)$
 $Cl_cavaco = Cl_cavaco_db * (1 - H2O_cavaco)$

"Proximate analysis (raw)"

$CFixed_cavaco = CFixed_cavaco_db * (1 - H2O_cavaco)$

$$\text{Vol_cavaco} = \text{Vol_cavaco_db} * (1 - \text{H2O_cavaco})$$

$$\text{Cz_cavaco} = \text{Cz_cavaco_db} * (1 - \text{H2O_cavaco})$$

$$\text{PCS_cavaco} = \text{PCS_cavaco_db} * (1 - \text{H2O_cavaco})$$

$$\text{PCS_cavaco} = \text{PCI_cavaco} + h_{\text{vap_H2O}} * (9 * \text{H_cavaco} + \text{H2O_cavaco})$$

"!Combustível"

"Análise da relação S/Cl do combustível, com base no trabalho de Markus Brostrom"

$$\text{S_in_fuel} = 1000 * \text{S_comb} / (32 * (1 - \text{H2O_comb})) \text{ "mol/kg_fuel_db"}$$

$$\text{Cl_in_fuel} = 1000 * \text{Cl_comb} / (35,5 * (1 - \text{H2O_comb})) \text{ "mol/kg_fuel_db"}$$

$$\text{S2Cl} = \text{S_in_fuel} / \text{Cl_in_fuel}$$

"Mistura lodo *pellet* cavaco - resultados trabalho Fabiana"

$$\text{"m_dot_comb} = 1 \text{ [kg/s]"}$$

$$\text{m_dot_comb} = \text{m_dot_cavaco} + \text{m_dot_pellet} + \text{m_dot_lodo}$$

"Share lodo"

$$\text{s_m_lodo} = \text{m_dot_lodo} / \text{m_dot_comb} \text{ "Share em base mássica"}$$

$$\text{s_t_lodo} = \text{m_dot_lodo} * \text{PCI_lodo} / (\text{m_dot_cavaco} * \text{PCI_cavaco} + \text{m_dot_pellet} * \text{PCI_pellet} + \text{m_dot_lodo} * \text{PCI_lodo}) \text{ "Share em base energética"}$$

"Share *pellet* no combustível"

$$\text{s_m_pellet} = \text{m_dot_pellet} / (\text{m_dot_cavaco} + \text{m_dot_pellet} + \text{m_dot_lodo}) \text{ "Share em base mássica"}$$

$$\text{s_t_pellet} = \text{m_dot_pellet} * \text{PCI_pellet} / (\text{m_dot_cavaco} * \text{PCI_cavaco} + \text{m_dot_pellet} * \text{PCI_pellet} + \text{m_dot_lodo} * \text{PCI_lodo}) \text{ "Share em base energética"}$$

"Ultimate analysis (raw)"

$$\text{H_comb} = (1 - \text{s_m_lodo} - \text{s_m_pellet}) * \text{H_cavaco} + \text{s_m_pellet} * \text{H_pellet} + \text{s_m_lodo} * \text{H_lodo}$$

$$\text{C_comb} = (1 - \text{s_m_lodo} - \text{s_m_pellet}) * \text{C_cavaco} + \text{s_m_pellet} * \text{C_pellet} + \text{s_m_lodo} * \text{C_lodo}$$

$$O_{comb} = (1-s_{m_lodo}-s_{m_pellet}) * O_{cavaco} + s_{m_pellet} * O_{pellet} + s_{m_lodo} * O_{lodo}$$

$$N_{comb} = (1-s_{m_lodo}-s_{m_pellet}) * N_{cavaco} + s_{m_pellet} * N_{pellet} + s_{m_lodo} * N_{lodo}$$

$$S_{comb} = (1-s_{m_lodo}-s_{m_pellet}) * S_{cavaco} + s_{m_pellet} * S_{pellet} + s_{m_lodo} * S_{lodo}$$

$$Cl_{comb} = (1-s_{m_lodo}-s_{m_pellet}) * Cl_{cavaco} + s_{m_pellet} * Cl_{pellet} + s_{m_lodo} * Cl_{lodo}$$

"Proximate analysis (raw)"

$$CFixed_{comb} = (1-s_{m_lodo}-s_{m_pellet}) * CFixed_{cavaco} + s_{m_pellet} * CFixed_{pellet} + s_{m_lodo} * CFixed_{lodo}$$

$$Vol_{comb} = (1-s_{m_lodo}-s_{m_pellet}) * Vol_{cavaco} + s_{m_pellet} * Vol_{pellet} + s_{m_lodo} * Vol_{lodo}$$

$$Cz_{comb} = (1-s_{m_lodo}-s_{m_pellet}) * Cz_{cavaco} + s_{m_pellet} * Cz_{pellet} + s_{m_lodo} * Cz_{lodo}$$

$$H2O_{comb} = (1-s_{m_lodo}-s_{m_pellet}) * H2O_{cavaco} + s_{m_pellet} * H2O_{pellet} + s_{m_lodo} * H2O_{lodo}$$

$$PCI_{comb} = (1-s_{m_lodo}-s_{m_pellet}) * PCI_{cavaco} + s_{m_pellet} * PCI_{pellet} + s_{m_lodo} * PCI_{lodo}$$

"!Problema da combustão"

"Carbono incombusto"

"Determinar valores de $C_{CzPesadas}$ e $C_{CzLeves}$ em laboratório"

$$\alpha = 0,7$$

$$\{C_{czPesadas} = 0,2 \text{ [kg/kg] "por kg de amostra de resíduo"}\}$$

$$\beta = 0,3$$

$$\{C_{czLeves} = 0,2 \text{ [kg/kg] "por kg de amostra de resíduo"}\}$$

$$C_r = \alpha * C_{czPesadas} + \beta * C_{czLeves} \text{ "kg/kg de resíduo"}$$

$$C_r = C_{cz} / (C_{cz} + Cz_{comb})$$

$$\{D_r = Cz_{comb} / (1 - C_r)\}$$

$$C_{cz} = C_r * D_r \text{ "kg carbono incombusto por kg de combust"}\}$$

$C_{corr} = C_{comb} - C_{cz}$ "Parcela de carbono que efetivamente participa da queima"

"Vazão de ar por kg de combustível queimado"

$m_{arEstS} = 138,2 * (C_{corr}/12 + H_{comb}/4 + S_{comb}/32 - O_{comb}/32)$

"kg_arSeco/kg_fuel"

$e = cv_{O2_gasS} / (21 - cv_{O2_gasS})$ "eg 0,1 - 10% air excess"

$m_{arS} = m_{arEstS} * (1+e)$ "Total de ar seco [kgAr/kgFuel]"

$m_{arH2O} = m_{arS} * \omega_{amb}$ "Parcela de umidade no ar de admissão em relação à massa de combustível [kgUmd/kgFuel]"

$m_{ar} = m_{arS} + m_{arH2O}$ "[kgAr/kgFuel]"

$m_{ar_1} = m_{ar} - m_{ar_2}$ "Ar primário"

$m_{ar_2} = m_{ar} * rel_{ar2}$ "Ar secundário"

{rel_ar2 = 0,2}

$v_{arEstS} = 106,7 * (C_{corr}/12 + H_{comb}/4 + S_{comb}/32 - O_{comb}/32)$

"Nm3_arSeco/kg_fuel"

"Vazão de gases de combustão por kg de combustível queimado"

$m_{gasEstS} = 44*(C_{corr}/12) + 64*(S_{comb}/32) + N_{comb} + m_{arN2}*m_{arEstS}$

"kg_gasSeco/kg_fuel - Não sobra oxigênio"

$m_{gasS} = 44*(C_{corr}/12) + 64*(S_{comb}/32) + N_{comb} + m_{arEstS}*m_{arN2}*(1+e) + m_{arEstS}*m_{arO2}*e$

$m_{gasH2O} = 18*(H_{comb}/2) + H2O_{comb} + m_{arH2O}$

$m_{gas} = 44*(C_{corr}/12) + 64*(S_{comb}/32) + 18*(H_{comb}/2) + H2O_{comb} +$

$N_{comb} + m_{arEstS}*m_{arN2}*(1+e) + m_{arEstS}*m_{arO2}*e + m_{arH2O}$

"kg_gas/kg_fuel"

$m_{gas_verif} = m_{gasS} + m_{gasH2O}$

$v_{gasS} = 22,4 * (C_{corr}/12 + S_{comb}/32 + N_{comb}/28) + v_{arN2}*v_{arEstS}*(1+e)$

$+ v_{arO2}*v_{arEstS}*e$ "Nm3/kg_fuel"

$v_{gas} = 22,4 * (C_{corr}/12 + S_{comb}/32 + N_{comb}/28 + (H_{comb}/2 + (H2O_{comb} + m_{arH2O})/18)) + v_{arN2}*v_{arEstS}*(1+e) + v_{arO2}*v_{arEstS}*e$ "Nm3/kg_fuel"

"!Ponto de orvalho H2SO4"

"Pressão parcial SO3"

$$cv_SO2_gas = 22,4 * (S_comb/32) / v_gas$$

$$ppmv_SO2_gas = cv_SO2_gas * 1e6$$

$$pp_SO2_gas = 760 * cv_SO2_gas$$

$$pp_SO3_gas = 0,025 * pp_SO2_gas$$

"Pressão parcial H2O"

$$cv_H2O_gas = 22,4 * (H_comb/2 + (H2O_comb + m_arH2O)/18) / v_gas$$

$$pp_H2O_gas = 760 * cv_H2O_gas$$

"Ponto de orvalho H2SO4"

$$1000/T_dp_K = 2,276 - 0,02943 * \ln(pp_H2O_gas) - 0,0858 * \ln(pp_SO3_gas) + 0,0062 * \ln(pp_H2O_gas) * \ln(pp_SO3_gas)$$

$$T_dp_degC = T_dp_K - 273$$

"!Balanço de energia no corpo principal da caldeira"

"Vapor saturado"

$$\{m_dot[4] = 40/3,6 \text{ "t/h"}\}$$

$$\{p[4] = 15 \text{ [bar]}\}$$

$$T[4] = t_sat(\text{Water}; P=p[4])$$

$$h[4] = \text{enthalpy}(\text{Water}; x=1; P=p[4])$$

"Purgas"

$$m_dot[5] = m_dot[4] * 0,03$$

$$p[5] = p[4]$$

$$h[5] = \text{enthalpy}(\text{Water}; x=0; P=p[5])$$

"Água de alimentação"

$$m_dot[3] = m_dot[4] + m_dot[5]$$

$$\{T[3] = 88 \text{ [C]}\}$$

$$p[3] = p[4]$$

$$h[3] = \text{enthalpy}(\text{Water}; T=T[3]; P=p[3])"$$

$T[3]=\text{temperature}(\text{Water};P=p[3];h=h[3])$

"Ar primário"

$\{T[8] = 153 \text{ [C]}\}$

$p[8] = 1 \text{ [bar]}$ "aproximação"

$m_{\text{dot}}[8] = m_{\text{ar}_1} * m_{\text{dot_comb}}$

$h[8] = (\text{enthalpy}(\text{Air};T=T[8]) - \text{enthalpy}(\text{Air};T=T_0))*m_{\text{arS}}/m_{\text{ar}} +$
 $(\text{Enthalpy}(\text{H}_2\text{O};T=T[8]) - \text{Enthalpy}(\text{H}_2\text{O};T=T_0))*m_{\text{arH}_2\text{O}}/m_{\text{ar}}$

"Ar secundário"

$T[10] = T_{\text{amb}}$

$p[10] = 1 \text{ [bar]}$ "aproximação"

$m_{\text{dot}}[10] = m_{\text{ar}_2} * m_{\text{dot_comb}}$

$h[10] = (\text{enthalpy}(\text{Air};T=T[10]) - \text{enthalpy}(\text{Air};T=T_0))*m_{\text{arS}}/m_{\text{ar}} +$
 $(\text{Enthalpy}(\text{H}_2\text{O};T=T[10]) - \text{Enthalpy}(\text{H}_2\text{O};T=T_0))*m_{\text{arH}_2\text{O}}/m_{\text{ar}}$

"Gases de combustão"

$\{T[12] = 260 \text{ [C]}\}$

$m_{\text{dot}}[12] = m_{\text{gas}} * m_{\text{dot_comb}}$

$\{h[12] = (m_{\text{gasS}}/m_{\text{gas}}) * (-0,1231899\text{E}3 + 0,4065568*(T[12]+273) + 0,5795050\text{E}-$
 $5*(T[12]+273)^2 + 0,631121\text{E}-7*(T[12]+273)^3 - 0,2924434\text{E}-10*(T[12]+273)^4 +$
 $0,2491009\text{E}-14*(T[12]+273)^5) * \text{convert}(\text{Btu}/\text{lbm};\text{kJ}/\text{kg}) + (m_{\text{gasH}_2\text{O}}/m_{\text{gas}}) *$
 $(\text{Enthalpy}(\text{H}_2\text{O};T=T[12]) - \text{Enthalpy}(\text{H}_2\text{O};T=T_0)) \text{ "[kJ/kg_gas]"}\}$

$h[12] = (44*(C_{\text{corr}}/12)*(enthalpy(\text{CarbonDioxide};T=T[12];P=P_0) -$
 $enthalpy(\text{CarbonDioxide};T=T_0;P=P_0)) + 64*(S_{\text{comb}}/32)*(enthalpy(\text{SO}_2;T=T[12]) -$
 $enthalpy(\text{SO}_2;T=T_0)) + (N_{\text{comb}} +$
 $m_{\text{arEstS}}*m_{\text{arN}_2}*(1+e))*(enthalpy(\text{N}_2;T=T[12]) - enthalpy(\text{N}_2;T=T_0)) +$
 $m_{\text{arEstS}}*m_{\text{arO}_2}*e*(enthalpy(\text{O}_2;T=T[12]) - enthalpy(\text{O}_2;T=T_0)) +$
 $(18*(H_{\text{comb}}/2) + H_2\text{O}_{\text{comb}} + m_{\text{arH}_2\text{O}}) * (\text{Enthalpy}(\text{H}_2\text{O};T=T[12]) -$
 $\text{Enthalpy}(\text{H}_2\text{O};T=T_0))) / m_{\text{gas}} \text{ "[kJ/kg_gas]"}$

"Cinzas pesadas"

$T_{\text{czPesadas}} = 1100 \text{ [C]}$

$Q_{\text{dot_perdCzPesadas}} = \alpha * C_{\text{z_comb}} * h_{\text{cz}}(T_{\text{czPesadas}}) * m_{\text{dot_comb}}$

$$m_{\text{dot}}[18] = \alpha * C_{z_comb} * m_{\text{dot_comb}}$$

"Cinzas leves"

$$h_{czLeves}[12] = h_{cz}(T[12])$$

$$Q_{\text{dot_perdCzLeves}}[12] = \beta * C_{z_comb} * h_{czLeves}[12] * m_{\text{dot_comb}}$$

$$m_{\text{dot}}[17] = \beta * C_{z_comb} * m_{\text{dot_comb}}$$

"Carbono incombusto"

$$q_{\text{perdInc}} = C_{cz} * PCS_c$$

$$PCS_c = 33727 \text{ "[kJ/kg_fuel]"}$$

$$Q_{\text{dot_perdInc}} = q_{\text{perdInc}} * m_{\text{dot_comb}}$$

"Perdas de calor por radiação e convecção"

$$Q_{\text{dot_loss}} = m_{\text{dot_comb}} * PCI_{\text{comb}} * loss$$

"Monóxido de carbono"

$$cv_{O2_gasS_ref} = 7 \text{ [%]}$$

$$\{cm_{CO_gasS_ref} = 200 \text{ [mg/Nm}^3\text{]}\}$$

$$cv_{CO_gasS_ref} = cv_{CO_gasS} * (21 - cv_{O2_gasS_ref}) / (21 - cv_{O2_gasS})$$

$$\rho_{CO} = \text{density}(\text{CarbonMonoxide}; T=0; P=p_{\text{amb}}) \text{ "kg/Nm}^3\text{"}$$

$$cm_{CO_gasS} = cv_{CO_gasS} * \rho_{CO} \text{ "mg}_{CO}/\text{Nm}^3, \text{ db"}$$

$$cm_{CO_gasS_ref} = cv_{CO_gasS_ref} * \rho_{CO} \text{ "mg}_{CO}/\text{Nm}^3, \text{ db"}$$

$$m_{\text{gasCO}} = cm_{CO_gasS} * v_{\text{gasS}} / 1e6 \text{ "kg}_{CO}/\text{kg}_{\text{fuel}}"$$

$$q_{CO} = m_{\text{gasCO}} * 10111 \text{ "kJ/kg}_{\text{fuel}}"$$

$$Q_{\text{dot}_{CO}} = q_{CO} * m_{\text{dot_comb}}$$

"Balanço de energia"

$$m_{\text{dot}}[3] * h[3] + m_{\text{dot}}[8] * h[8] + m_{\text{dot}}[10] * h[10] + m_{\text{dot_comb}} * PCI_{\text{comb}} =$$

$$m_{\text{dot}}[4] * h[4] + m_{\text{dot}}[5] * h[5] + m_{\text{dot}}[12] * h[12] + Q_{\text{dot_loss}} +$$

$$Q_{\text{dot_perdCzPesadas}} + Q_{\text{dot_perdCzLeves}}[12] + Q_{\text{dot_perdInc}} + Q_{\text{dot}_{CO}}$$

"Temperatura adiabática de chama"

$$m_{\text{dot}}[8] * h[8] + m_{\text{dot}}[10] * h[10] + m_{\text{dot_comb}} * PCI_{\text{comb}} = m_{\text{dot}}[12] * h_{\text{ad}}$$

$$h_{ad} = (m_{gasS}/m_{gas}) * (-0,1180095E3 + 0,3635095*(T_{ad}+273) + 0,1039228E-3*(T_{ad}+273)^2 + 0,2721820E-7*(T_{ad}+273)^3 - 0,3718257E-11*(T_{ad}+273)^4 + 0,2030596E-15*(T_{ad}+273)^5) * \text{convert}(\text{Btu}/\text{lbm};\text{kJ}/\text{kg}) + (m_{gasH2O}/m_{gas}) * (\text{Enthalpy}(\text{H2O};T=T_{ad}) - \text{Enthalpy}(\text{H2O};T=T_0)) \text{ "[kJ/kg}_{gas}\text{]"}$$

"!Pré-aquecedor de ar"

"Ar - entrada"

$$T[7] = T_{amb}$$

$$p[7] = 1 \text{ [bar] "aproximação"}$$

$$m_{dot}[7] = m_{dot}[8]$$

$$h[7] = (\text{enthalpy}(\text{Air};T=T[7]) - \text{enthalpy}(\text{Air};T=T_0))*m_{arS}/m_{ar} + (\text{Enthalpy}(\text{H2O};T=T[7]) - \text{Enthalpy}(\text{H2O};T=T_0))*m_{arH2O}/m_{ar}$$

"Gás - saída"

$$m_{dot}[13] = m_{dot}[12]$$

$$\{h[13] = (m_{gasS}/m_{gas}) * (-0,1231899E3 + 0,4065568*(T[13]+273) + 0,5795050E-5*(T[13]+273)^2 + 0,631121E-7*(T[13]+273)^3 - 0,2924434E-10*(T[13]+273)^4 + 0,2491009E-14*(T[13]+273)^5) * \text{convert}(\text{Btu}/\text{lbm};\text{kJ}/\text{kg}) + (m_{gasH2O}/m_{gas}) * (\text{Enthalpy}(\text{H2O};T=T[13]) - \text{Enthalpy}(\text{H2O};T=T_0)) \text{ "[kJ/kg}_{gas}\text{]"}$$

$$h[13] = (44*(C_{corr}/12)*(\text{enthalpy}(\text{CarbonDioxide};T=T[13];P=P_0) - \text{enthalpy}(\text{CarbonDioxide};T=T_0;P=P_0)) + 64*(S_{comb}/32)*(\text{enthalpy}(\text{SO2};T=T[13]) - \text{enthalpy}(\text{SO2};T=T_0)) + (N_{comb} + m_{arEstS}*m_{arN2}*(1+e))*(\text{enthalpy}(\text{N2};T=T[13]) - \text{enthalpy}(\text{N2};T=T_0)) + m_{arEstS}*m_{arO2}*e*(\text{enthalpy}(\text{O2};T=T[13]) - \text{enthalpy}(\text{O2};T=T_0)) + (18*(H_{comb}/2) + H2O_{comb} + m_{arH2O}) * (\text{Enthalpy}(\text{H2O};T=T[13]) - \text{Enthalpy}(\text{H2O};T=T_0))) / m_{gas} \text{ "[kJ/kg}_{gas}\text{]"}$$

"Cinzas leves - saída"

$$h_{czLeves}[13] = h_{cz}(T[13])$$

$$Q_{dot_perdCzLeves}[13] = \beta * C_{z_comb} * h_{czLeves}[13] * m_{dot_comb}$$

"Balanço de energia"

$$m_{\text{dot}}[7] * h[7] + m_{\text{dot}}[12] * h[12] + Q_{\text{dot_perdCzLeves}}[12] = m_{\text{dot}}[8] * h[8] + m_{\text{dot}}[13] * h[13] + Q_{\text{dot_perdCzLeves}}[13]$$

"!Economizador"

"Água de alimentação - entrada"

$$\{T[2] = 60 \text{ [C]}\}$$

$$p[2] = p[4] \text{ "aproximação"}$$

$$h[2] = \text{enthalpy}(\text{Water}; T=T[2]; P=p[2])$$

$$m_{\text{dot}}[2] = m_{\text{dot}}[3]$$

"Gás - saída"

$$T[14] = T[13]$$

$$m_{\text{dot}}[14] = m_{\text{dot}}[13]$$

$$\{h[14] = (m_{\text{gasS}}/m_{\text{gas}}) * (-0,1231899E3 + 0,4065568*(T[14]+273) + 0,5795050E-5*(T[14]+273)^2 + 0,631121E-7*(T[14]+273)^3 - 0,2924434E-10*(T[14]+273)^4 + 0,2491009E-14*(T[14]+273)^5) * \text{convert}(\text{Btu/lbm}; \text{kJ/kg}) + (m_{\text{gasH2O}}/m_{\text{gas}}) * ((\text{Enthalpy}(\text{H2O}; T=T[14]) - \text{Enthalpy}(\text{H2O}; T=T_0))) \text{ "[kJ/kg_gas]"}\}$$

$$h[14] = (44*(C_{\text{corr}}/12)*(\text{enthalpy}(\text{CarbonDioxide}; T=T[14]; P=P_0) - \text{enthalpy}(\text{CarbonDioxide}; T=T_0; P=P_0)) + 64*(S_{\text{comb}}/32)*(\text{enthalpy}(\text{SO2}; T=T[14]) - \text{enthalpy}(\text{SO2}; T=T_0)) + (N_{\text{comb}} + m_{\text{arEstS}}*m_{\text{arN2}}*(1+e))*(\text{enthalpy}(\text{N2}; T=T[14]) - \text{enthalpy}(\text{N2}; T=T_0)) + m_{\text{arEstS}}*m_{\text{arO2}}*e*(\text{enthalpy}(\text{O2}; T=T[14]) - \text{enthalpy}(\text{O2}; T=T_0)) + (18*(H_{\text{comb}}/2) + H2O_{\text{comb}} + m_{\text{arH2O}}) * (\text{Enthalpy}(\text{H2O}; T=T[14]) - \text{Enthalpy}(\text{H2O}; T=T_0))) / m_{\text{gas}} \text{ "[kJ/kg_gas]"})$$

"Cinzas leves - saída"

$$h_{\text{czLeves}}[14] = h_{\text{cz}}(T[14])$$

$$Q_{\text{dot_perdCzLeves}}[14] = \beta * C_{\text{z_comb}} * h_{\text{czLeves}}[14] * m_{\text{dot_comb}}$$

"Balanço de energia"

$$m_{\text{dot}}[2] * h[2] + m_{\text{dot}}[13] * h[13] + Q_{\text{dot_perdCzLeves}}[13] = m_{\text{dot}}[3] * h[3] + m_{\text{dot}}[14] * h[14] + Q_{\text{dot_perdCzLeves}}[14]$$

"!Eficiência"

$$\text{Eta} = Q_{\text{dot_util}} / Q_{\text{dot_input}}$$

$$\text{Eta}_{\text{II}} = 1 - (Q_{\text{dot_loss_fluegas}} + Q_{\text{dot_loss}} + Q_{\text{dot_loss_CzLeves}} + Q_{\text{dot_loss_CzPesadas}} + Q_{\text{dot_loss_incomb}} + Q_{\text{dot_loss_CO}} + Q_{\text{dot_loss_purgas}}) / Q_{\text{dot_input}}$$

"Perdas"

$$Q_{\text{dot_loss_fluegas}} = m_{\text{dot}}[14] * h[14] \text{ "kW"}$$

$$Q_{\text{dot_loss_calor}} = Q_{\text{dot_loss}}$$

$$Q_{\text{dot_loss_CzLeves}} = Q_{\text{dot_perdCzLeves}}[14] \text{ "kW"}$$

$$Q_{\text{dot_loss_CzPesadas}} = Q_{\text{dot_perdCzPesadas}} \text{ "kW"}$$

$$Q_{\text{dot_loss_incomb}} = Q_{\text{dot_perdInc}} \text{ "kW"}$$

$$Q_{\text{dot_loss_CO}} = Q_{\text{dot_CO}} \text{ "kW"}$$

$$Q_{\text{dot_loss_purgas}} = m_{\text{dot}}[5] * h[5]$$

"Input"

$$Q_{\text{dot_input}} = m_{\text{dot_comb}} * \text{PCI_comb} + m_{\text{dot}}[7] * h[7] + m_{\text{dot}}[10] * h[10]$$

"Energia útil"

$$Q_{\text{dot_util}} = m_{\text{dot}}[4] * h[4] - m_{\text{dot}}[2] * h[2]$$

$$T_{\text{sat_H2O}} = t_{\text{sat}}(\text{Water}; P=0,1896)$$